

AVERMA

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES Y AMBIENTE

Volumen 27
Noviembre de 2023





Asociación Argentina de
Energías Renovables y Ambiente - ASADES

AVANCES EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE – AVERMA

Vol. 27, 2023 ISSN 2796-8111

XLV Reunión de Trabajo de la ASADES

Secciones 1 a 9

COMISIÓN DE PUBLICACIONES

Directora

Martínez Bogado, Mónica

Editores

Abalone, Rita – Alonso-Suarez, Rodrigo - Balter, Julieta - Barral, Jorge – Binda, Camila - Chévez,
Pedro - Dellicompagni, Pablo – Denegri, María José - Díaz, Andrés – Durán, Julio - Esparza, Jérica -
Esteban, Sonia – García, Víctor – Gea Salim, Camila - Guido, Rocío – Hongn, Marcos - Javi, Verónica
- Lema, Alba - Linares, Juan Francisco - Martini, Irene - Pasculli, Mónica - Plá, Juan – Salvo, Aien –
Tamasi, Mariana - Videla, Mariela - Viegas, Graciela - Zoloff Michoff, Martín

Apoyo técnico

Tolaba, Miguel - Troviano, Mauricio

COMITÉ EVALUADOR

Abalone, Rita
Ajmat, Rajmat
Alchapar, Noelia
Alías, Hermina
Altobelli, Fabiana Noelia
Aristegui, Rosana
Bahamonde, Pablo
Barea, Gustavo
Barral, Jorge Raúl
Barros, María Victoria
Bertossi, Marcelo
Binda Galindez, Camila
Birche, Mariana
Bolzi, Claudio
Boutet, María Laura
Cadena, Carlos Alberto
Camacho Roberts, Magdalena
Capuano, Vicente
Cardoso, Betina
Castro, Néstor
Cesare, Mary Flor
Chemes, Jorge
Chevez, Pedro
Cisterna, Marta Susana
Colman Lerner, Jorge Esteban
Condorí, Miguel Ángel
Correa, Gabriel
Cortizo, Daniela
Coutsiers; Ernesto
Cravero, Silvia Ana
De Paul, Irene
Dellicompagni, Pablo
Denegri, María José
Di Lalla, Nicolás
Dicroce, Luciano
Díscoli, Carlos Alberto
Diulio, María de la Paz
Durán, Julio César
Elsinger, David
Emanuel Díaz, Andrés Emanuel
Esteban, Sonia
Fernández, Guillermo
Fernández, Jorge

Filippín, Celina
Firman, Andrés
Flores Larsen, Silvana
Franco, Judith Ada
Galimberti, Pablo Daniel
Ganem, Carolina
García, Víctor
García Schilardi, María Emilia
Gardey Merino, María Celeste
Garita, Sebastián
Gastón Rodríguez, Lucas
Gatto, Laura
Gennari, Fabiana
Giglio, María Luciana
González, Facundo
González, Jorge
Gonzálo, Guillermo
Haim, Alejandro
Hernández, Alejandro Luis
Hongn, Marcos
Hümoller, Juan Martín
Javi, Verónica
Krautner, Alejandro Javier
Lanson, Anahí
Lavorante, María José
Lell, Julián Alejandro
Lema, Alba
Lucchini, Juan Martín
Luque, Víctor
Manzano, Eduardo
Marino, Fernando
Martín Clauser, Nicolás
Martin, Andrés
Martínez, Claudia
Masseilot, Bárbara
Mathisson, Juan
Mendoza, Dora
Miguel, Sebastián
Moehlecke, Adriano
Mora Fresca, Carlos Eduardo
Morsetto, Jorge Mario
Moura Barbosa, Elielza
Nores Pondal, Federico

Odicino, Luis
Oliva, Rafael
Orte, Facundo
Pedace, Roque
Petrucci, Diego
Pilar, Claudia
Plá, Juan
Platino, Manuel
Politti, Marcos
Polliotto, Gabriela
Pontín, María Isabel Rita
Quiroga, Viviana
Raggio, Daniel
Ramajo, Damián
Ramos Martins, Fernando
Rasuk, Cecilia
Re, Guillermina
Rodríguez Soler, Rocío
Rodríguez, Ramiro
Rossi, Ezequiel
Salazar, Germán
Salvo, Aien Weni
Sambrano, Edgardo
Samper, Mauricio
San Juan, Gustavo
Sánchez, Yanina
Sarache Piña, Johan
Sarmiento, Joaquín
Schmidt, Javier
Spina, Guillermo
Stoll, Rodolfo
Tilca, Fernando
Vázquez, Jorge
Velázquez, Diego
Vera, Luis
Viegas, Graciela
Vilela, Olga
Villalba, Ayelén María
Vivas, Federico
Yajnes, Marta Edith
ZanESCO, Izete
Zitzer, Alejandro
Zizzias, Javier

ÍNDICE

TEMA 1. ARQUITECTURA AMBIENTALMENTE CONSCIENTE Y HÁBITAT

POTENCIAL DE VENTILACIÓN NATURAL EN LA PROVINCIA DE SALTA. EFICIENCIA DE LA VENTILACIÓN NATURAL NOCTURNA EN VIVIENDAS SOCIALES

Camila Escudero, Silvana Flores Larsen 11

DIAGNÓSTICO DEL NIVEL DE SENSIBILIZACIÓN AMBIENTAL DE UNA COMUNIDAD ESCOLAR

Alción Alonso Frank, Celina Bustos, Guillermina Ré 22

DISEÑO Y SIMULACIÓN TÉRMICA DE UN INVERNADERO ANDINO ESCOLAR EN ESTACIÓN SALAR DE POCITOS, PROVINCIA DE SALTA

Sofía Avalos Ambroggio, Sebastián Miguel 33

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SISTEMAS DE PARASOLES PARA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN CLIMAS CON ALTA HELIOFANÍA

Alicia Betman, Julieta Balter, Marcos Hongn, Carolina Ganem 45

PISO RADIANTE DE HORMIGÓN CON AGUA ENCAPSULADA Y RECIRCULACIÓN AUTÓNOMA, PRIMEROS AVANCES

Nicolás Di Lalla, Andrés E. Díaz, Alejandro L. Hernández 56

ARBOLADO EN UN ESPACIO VERDE PÚBLICO DE YERBA BUENA, TUCUMÁN. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Marta S. Cisterna, Luciano M. Garbero, Fernando Martínez 68

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HABITÁCULOS ADAPTATIVOS PARA MITIGAR LA VULNERABILIDAD HABITACIONAL EN CONTEXTOS DE EMERGENCIA

Gustavo J. Barea Paci, Carolina Ganem, Victoria Mercado, Lorena Córica, Virginia Gassull, Florencia Ginestar, Noelia Alchapar, Ayelén Villalba, Javier Garro, Raúl Mercado, Carlos Abraham, Julieta Balter 80

CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN AULAS ESCOLARES, EN LA CIUDAD DE LA PLATA, BUENOS AIRES, ANTE SITUACIÓN DE PANDEMIA DE COVID-19

Graciela Viegas, Gustavo San Juan, Jesica Esparza, Alejandro Arévalo 93

ANÁLISIS DE TRAZAS FERROVIARIAS PARA SU ADAPTACIÓN A UN SISTEMA ELÉCTRICO A BATERIAS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS.	105
Garay Jorge José; Cuestas Facundo; Ibarra Santiago, Benito Marcos	
DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO RADIANTE MEDIANTE TUBOS EMBEBIDOS INTEGRADO A UNA ENVOLVENTE EDILICIA	113
Federico Montenegro, Marcos Hongn, Tomas Concha	
IMPACTO AMBIENTAL DE SOL Y VIENTO EN ESPACIOS URBANOS: ESTUDIO Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO AL ENTORNO DE EDIFICIOS EN ALTURA	124
Silvia de Schiller y John Martin Evans	
TEMA 2. ENERGÍA SOLAR: APLICACIONES TÉRMICAS, AGRÍCOLAS, QUÍMICAS E INDUSTRIALES	
RENDIMIENTO TERMICO EN CIRCUITO ABIERTO DE UN COLECTOR SOLAR DE AIRE DE GRAN LONGITUD PARA SECADO INDUSTRIAL	134
Miguel Condorí, Gonzalo Durán	
SOFTWARE PARA EL ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TERMICO DE SISTEMAS DE CONCENTRACION SOLAR	146
Hugo Aparicio, Pablo Dellicompagni, Carlos Cadena	
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN CIRCUITO TÉRMICO PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL CON ENERGÍA SOLAR	158
R. Stoll, J. Daghero, E. Podversic, C. Capozzuca, G. Paisio	
CONSTRUCCIÓN Y ANALISÍS TÉRMICO DE UN INVERNADERO EN LA ESCUELA ALBERGUE DE CERRO NEGRO DEL TIRAO	169
José E. Quiñonez, Valentín Becchio, Rodolfo A. Di Fonzo, Hugo G. Ortiz, Alejandro L. Hernández	
SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO DE BAJA ENTALPÍA CON SIMUSOL	181
Pablo Dellicompagni, Juan Francisco Linares	

ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN DOS COLECTORES SOLARES CON ACUMULACIÓN INTEGRADAS, CONSTRUIDOS CON SIMILARES MATERIALES Y MÉTODOS

Juan M. Lucchini, Javier H. Garnica, Jorge R. Barral, Jorge M. Morsetto 193

NORMA PARA CARACTERIZAR TÉRMICAMENTE A LOS SISTEMAS COMPACTOS SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AGUA RESIDENCIAL EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

Jorge R. Barral, Anahí Lanson, Federico Nores Pondal, Alejandro Chiaravalotti, Pablo Bertinat, Joaquín Garat 205

TEMA 3. ENERGÍA SOLAR: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA

METODOLOGIA PARA INSPEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA

Luiz Carlos P. de Souza Junior, Chigueru Tiba, Elielza M. S. Barbosa 217

MODELAGEM TÉRMICA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CONDIÇÕES DE ALTA VARIABILIDADE

João Victor Furtado, Janis Galdino, Olga Vilela, Emerson Gomes 227

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA RESIDENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DURANTE UN AÑO DE OPERACIÓN

Julio C. Durán, Elena M. Godfrin, Alejandro Krautner, Ignacio Tuxen-Bang 239

TEMA 4. ENERGÍA EÓLICA, GEOTÉRMICA, MAREOMOTRIZ, HIDRÁULICA, BIOMASA Y BIOGÁS

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL CENTRO DE ARGENTINA MEDIANTE EL USO DE WAVELETS

Emilio Bianchi, Tomás Guzden 251

DISEÑO PRELIMINAR PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PARA INDUSTRIA EN ZONA AISLADA, UTILIZANDO ENERGÍA EÓLICA E HIDRÓGENO

Fernando Tilca, Juan Mathisson, Marcelo Balbi, Humberto Bárcena 262

TEMA 5. USO EFICIENTE Y RACIONAL DE LA ENERGÍA

VIVIENDAS EN VULNERABILIDAD ENERGÉTICA. CASO DE ESTUDIO EN USHUAIA, PATAGONIA, ARGENTINA

Camila Andrea Ludueña, Consolación Ana Acha Román 276

INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AIRE EN UNA ESTUFA DE CURADO DE TABACO

Fabiana Altobelli, Miguel Condorí, Gonzalo Durán, Ileana Cruz 287

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ESTABLECIMIENTOS DE SALUD PARA LA INCORPORACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Joaquina Cristeche, Emilia Urteche, Dante Babero, Irene Martini, Silvana Flores Larsen 299

INSTRUMENTOS PARA COMBATIR A LA POBREZA ENERGÉTICA EN LOS PAÍSES DE AMÉRICA LATINA: LOS CASOS DE ARGENTINA, BRASIL Y CHILE

Mauro Alejandro Montone, Rodrigo Javier Durán, Miguel Ángel Condorí 310

CARACTERIZACIÓN DE PATRONES DE CONSUMO ELÉCTRICO E INSERCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN EDIFICIOS UNIVERSITARIOS

Pedro Chevez, Javier Viñuela, Emilia Urteche, Santiago Fondoso e Irene Martini 321

CAMINO HACIA LA SUSTENTABILIDAD EMPRESARIAL: UN ANÁLISIS INTEGRAL DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL EN EMPRESAS DE LA CUENCA MATANZA RIACHUELO

Jonathan R. Morris, Analía B. Figueira, Martin Capasso, Cristina M. Lafflitto 333

ANÁLISIS EPDA EN VIVIENDAS DE BAJA DENSIDAD CONSTRUIDAS EN LA CIUDAD DE CONCEPCIÓN EN EL PERIODO 2018 A 2019

David Elsinger, Beatriz S. Garzón 346

TEMA 6. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

PAVIMENTOS DE ASFALTO Y HORMIGÓN MODIFICADOS PARA MEJORAR EL MICROCLIMA URBANO

Pablo Cabrera Ojeda, Gerardo Botasso, Ana M. Castro Luna 353

DESLIGNIFICACIÓN DE BIOMASA PARA SU USO EN BIORREFINERÍA

Pablo Campagna, Paula Saires, Marisa Falco, Melisa Bertero 363

CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS DE SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES

Paula Saires, Melisa Bertero, Ulises Sedran 374

SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO Y SOLAR FOTOVOLTAICO EN MENDOZA, ARGENTINA

Andrés O. Benito, Nicolás Villanueva, Cristian Morillas, Alejandro Burlot, Alejandro P. Arena, Juan Carlos Luna 386

TEMA 7. RADIACIÓN SOLAR Y CLIMA

CALIBRACIÓN DE UN RADIÓMETRO FOTOVOLTAICO SEGMENTADA EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA

Raúl Righini, Rosana Aristegui, Santiago Fioretti 398

CONSTRUCCIÓN DE UN ADQUISIDOR DE DATOS SOLARIMÉTRICOS ONLINE CONFIABLE Y DE BAJO COSTO

Raúl Righini, Julián A. Lell, Pablo E. Ruiz, Sebastián Bazán 405

AVANCES EN LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES GOES-16

R. Ledesma, G. Salazar, O. Vilela 413

MODELADO DE LA TRANSMITANCIA GLOBAL FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA DE MATERIALES UTILIZADOS EN INVERNADEROS EN URUGUAY

J. L. Di-Laccio, C. Barros, A. Monetta, G. Vitale, R. Alonso-Suárez, G. Abal 428

VALIDAÇÃO DA BASE DE DADOS NSRDB DE ESPECTRO DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL PARA A CIDADE DE PETROLINA – BRASIL	
Janis Joplim Bezerra Galdin, Olga de Castro Vilela, Naum Fraidenraich, Christian Gueymard	440
CONTROL DE CALIDAD DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL OBTENIDOS POR ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS	
Fernando Nollas, Pablo F. Orte, Julián Lell, Rodrigo Alonso-Suarez, German A. Salazar	449
MODELOS DE MACHINE LEARNING PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL EN LA PAMPA HÚMEDA CON INFORMACIÓN SATELITAL MULTIESCALA	
Paula Iturbide, Ximena Orsi, María José Denegri, Santiago Fioretti, Pablo Ruiz, Sergio Luza, Valeria Stern, Rodrigo Alonso-Suárez, Franco Ronchetti	462
EVALUACIÓN EN URUGUAY DEL PRODUCTO DSR GOES-16 DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL	
R. Ledesma, R. Alonso-Suárez, A. Monetta, A. Laguarda, O. Vilela, G. Salazar	474
TEMA 8. ENERGÍAS RENOVABLES Y SOCIEDAD	
LA EDUCACIÓN EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA. CARRERAS DE NIVEL SUPERIOR UNIVERSITARIO Y NO UNIVERSITARIO CON TEMÁTICA ENERGÉTICA DIRIGIDAS A DOCENTES	
Carlos Mora Fresca, Alberto Balegno Mazzini	484
VIVIENDAS SOCIALES EN TIERRA DEL FUEGO: RESIDUOS FORESTALES PARA CALEFACCIÓN, AGUA CALIENTE SANITARIA Y REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO2	
Alfarano Javier, Luque Vázquez Florencia, Moreno Valeria, Monasterolo Nicolás, Carranza Juan Ignacio	496
HORNO SOLAR TUBULAR CON CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO	
Tarifa H. Yamil, Di Lalla Nicolas, Díaz Andrés Emanuel, Hernández Alejandro Luis	508
NOCIONES DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN SALTA: UNA APROXIMACIÓN A CÓMO (RE) PRODUCEN SENTIDOS LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN LOCALES (ARGENTINA, 2023)	
Facundo D.F. González, Melanie L. Pedraza, Candelaria N. Cornú, Belisario Mendieta Albarracín	515

<p>ÍNDICE MULTIDIMENSIONAL DE POBREZA ENERGÉTICA PARA HOGARES TIPO BARRIO POPULAR: ENFOQUE DESDE EL ACCESO SEGURO, CALIDAD HABITACIONAL Y EQUIDAD ENERGÉTICA</p> <p>Danae Franco Lopera, Rodrigo Durán, Miguel Ángel Condorí</p>	527
<p>INSTRUMENTOS Y DESAFÍOS DE LA POLÍTICA PÚBLICA ENERGÉTICA EN LA PROVINCIA DE LA PAMPA</p> <p>Georgina Doroni, Florencia Anabel Rivara</p>	539
<p>DISEÑO, CONTRUCCIÓN Y ENSAYO DE UN CONCENTRADOR SOLAR CILINDROPARABÓLICO PARA FINES EDUCATIVOS</p> <p>Pablo Dellicompagni, Aien Salvo, Mónica Rojas Villena</p>	550
<p>REFLEXIONES EN TORNO AL TRAYECTO SINÉRGICO DE LA RED TEMÁTICA REBIBIR Y SU ESTRATEGIA COMUNICACIONAL PARA LA PROMOCIÓN DEL USO DE BIOMASA Y BIOENERGÍA EN IBEROAMÉRICA</p> <p>Camila Binda Galindez, Aien W. Salvo, Silvina M. Manrique, Verónica M. Javi, Florencia Villafañe, Beatriz Balderrama</p>	560
<p>SENTIDOS EN TORNO A LA DIMENSIÓN ENERGÉTICA EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HÁBITAT EN TERRITORIOS INDÍGENAS EN LA PROVINCIA DE SALTA</p> <p>Facundo D.F. González, Juan F. Picabea, Pablo A. Duran</p>	572
<p>TEMA 9. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO</p>	
<p>COMPORTAMIENTO EN ESCALA DEL COSTO NIVELADO DEL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN LATINOAMÉRICA</p> <p>Ernesto Coutsiers, Marcelo Gea, Ramiro Rodríguez</p>	584
<p>COSTO NIVELADO DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO SUBTERRÁNEO DE HIDRÓGENO EN LATINOAMÉRICA</p> <p>Ernesto Coutsiers, Marcelo Gea, Ramiro Rodríguez</p>	593
<p>IDENTIFICACIÓN DE REGÍMENES Y NÚMEROS ADIMENSIONALES EN LA FUSIÓN DE UNA GRASA ÓRGÁNICA</p> <p>María del S. Vilte, Sonia Esteban, Carlos Martinez, Dante Domínguez</p>	604

EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE MÁS ADECUADOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CALOR DE UN COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE

F. López, A. Hernández

616

POTENCIAL DE VENTILACIÓN NATURAL EN LA PROVINCIA DE SALTA. EFICIENCIA DE LA VENTILACIÓN NATURAL NOCTURNA EN VIVIENDAS SOCIALES

Camila Escudero¹, Silvana Flores Larsen²

¹Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina

²INENCO – (UNSa – CONICET) – Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina

Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387- 4255389 – Email: escuderoCamila32@gmail.com

RESUMEN: El trabajo estudia el potencial de ventilación natural en siete localidades de la provincia de Salta con condiciones climáticas diferentes y la Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural, para una vivienda social ubicada con la misma orientación en tres localidades seleccionadas (Salta Capital, Cafayate y Rivadavia). Para ello, se utilizó el software *EnergyPlus*, simulando una vivienda del IPV en estas tres locaciones para los meses de octubre a marzo, suponiendo ventilación nocturna de 19 a 7 horas. Los resultados indican que los niveles de potencial de ventilación de Salta se alcanzan un máximo de 22% en diciembre y un mínimo de 6% en octubre, repitiéndose este patrón para Cafayate con valores un poco mejores, 22% en diciembre y de 14% en octubre, los de Rivadavia insuficientes presentando 16% de máximo en octubre y 5% de mínimo en enero. En base a lo observado, se sugiere mejorar la ventilación natural del hogar a través del correcto dimensionamiento y ubicación de las aberturas, complementando con extracción activa del aire de ser necesario.

Palabras clave: Ventilación Natural, vivienda social, ahorro energético, confort térmico, simulación computacional

INTRODUCCIÓN

El sobrecalentamiento interior causado por temperaturas cada vez más elevadas y olas de calor más frecuentes debido al cambio climático es un problema que adquiere relevancia y que es necesario abordar con urgencia. En Argentina las olas de calor son cada vez más frecuentes (Camilloni, 2018), de mayor intensidad y duración. Por ello, es importante estudiar la efectividad de distintas estrategias de refrescamiento, principalmente las estrategias pasivas que permiten disminuir el consumo energético edilicio. Una de las estrategias de refrescamiento más utilizadas es la ventilación natural, que ha demostrado ser una técnica efectiva para la reducción del consumo energético de edificios (Su *et al.*, 2023; Li y Wang, 2020; Yao *et al.*, 2009; Cardinale *et al.*, 2003; Oropeza-Pérez y Østergaard, 2014; Rawat y Kumar, 2023). La efectividad de la ventilación natural para reducir el consumo energético depende principalmente del clima del lugar, del diseño y materiales del edificio y de las acciones de los ocupantes en relación a la apertura o cierre de ventanas (Liu y Lee, 2020; Yoon *et al.*, 2020). En distintas investigaciones se utiliza el término “potencial de ventilación natural” para indicar el uso de la ventilación natural, principalmente en dos aspectos. El primero, busca analizar si una determinada locación cuenta con las cualidades meteorológicas, climáticas y térmicas para que en un edificio se pueda usar la ventilación natural como un método de enfriamiento del interior. El segundo, busca describir el potencial de un edificio para utilizar la ventilación natural, analizando la posición de sus ventanas, el tamaño de las aberturas, etc. En consecuencia, es importante poder determinar el potencial de ventilación en una localidad de acuerdo a sus condiciones climáticas y su efecto sobre los ambientes interiores.

Existen diversas metodologías (Yang *et al.*, 2005; Yao *et al.*, 2009; Germano *et al.*, 2006) para cuantificar el potencial de ventilación natural (NVP), las más convencionales incluyen velocidades de flujo de aire, recambios de aire por hora (ACH), o el número total de horas en un año en que haya buenas

condiciones para utilizar ventilación natural (horas NV). Otras métricas más novedosas son el potencial climático para la ventilación natural (CPNV), la diferencia de presión horas Pascal (PDPH), el potencial de enfriamiento climático (CCP), el indicador de performance de ventilación (VPI), las horas de ventilación natural satisfechas (SNVH) y la efectividad de ventilación natural (NVE). En este trabajo se utilizan las horas de ventilación natural (NV) disponibles (Chen *et al.*, 2017; Yoon *et al.*, 2020) que se definen como el número de horas en un año típico (de las 8760h que posee) de las cuales las condiciones climáticas son óptimas para poder utilizar ventilación natural. Éste es un indicador que mide el potencial máximo de ventilación natural para un sitio determinado.

Para estimar la eficacia de la ventilación natural en un edificio para disminuir la temperatura interior, las métricas a utilizar deben tener en cuenta la información meteorológica en conjunto con las características específicas del diseño del edificio, como ser la respuesta dinámica de los materiales de la envolvente, el diseño de las ventanas, de las aberturas, las respuestas estacionarias y las dinámicas del edificio al clima en el que se encuentra. En este trabajo se propone estimar la eficacia de la ventilación natural del método propuesto por Yoon *et al.* (2020), modificado para acoplarlo a simulaciones numéricas, como se explica en las siguientes secciones.

En este marco, los objetivos de este trabajo son: estudiar el potencial de ventilación natural existente en siete localidades de la provincia de Salta con diferentes climas, proponer una metodología para estimar el potencial de ventilación en un edificio y aplicarlo a una vivienda para estudiar los efectos de la ventilación natural en la misma, ubicada en tres localidades de la provincia de Salta. El caso de estudio seleccionado es una residencia del Instituto Provincial de la Vivienda (IPV). La tipología seleccionada es representativa de las viviendas sociales en el Noroeste y en su mayoría están habitadas por sectores con dificultades para afrontar el costo del equipamiento y la energía necesarios para acondicionar térmicamente sus domicilios. La vivienda se emplazará en las tres localidades del estudio y se analizará el impacto de la ventilación natural en la misma.

METODOLOGÍA

Localidades del estudio y datos climáticos

Se seleccionaron siete localidades en la provincia de Salta que presentan condiciones climáticas bien diferenciadas: las ciudades de Salta, Orán, Tartagal y Rosario de la Frontera (clima subtropical húmedo con estación seca y verano cálido, Cwa según la clasificación climática de Köppen-Geiger), Cafayate (en los Valles Calchaquíes, clima árido templado y frío, con inviernos secos BWk según Köppen-Geiger) y Rivadavia y Güemes (en el Chaco salteño, clima semiárido cálido BSh según Köppen-Geiger). Rivadavia es una de las ciudades en las que las altas temperaturas suelen ser noticia, como sucedió el 7 de diciembre de 2022 en que el registró 46 °C de temperatura máxima la convirtió en una de las más calurosas del mundo durante ese día.

Para el estudio se utilizaron los años típicos meteorológicos de cada una de las localidades. Se utilizó la base de datos climáticos de climate.onebuilding.org, la cual dispone de los años típicos meteorológicos para Salta Capital, Orán, Tartagal y Rivadavia calculados a partir de datos provistos por las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el periodo más actual 2007-2021. Para las otras localidades (Cafayate, Güemes y Rosario de la Frontera), en que no existe una estación del SMN, se utilizó el software Meteonorm para generar los datos del año típico meteorológico.

Horas de ventilación (NV) y Potencial de Ventilación Natural (CPNV)

Se considera que el aire exterior tiene potencial para ventilación natural cuando su temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y la velocidad de viento se encuentran dentro de los rangos que se definen a continuación.

Para establecer la temperatura de bulbo seco máxima (T_{up}) se calcula la temperatura máxima estimada por el modelo de confort adaptativo propuesto por de Dear y Brager (de Dear y Brager, 2002), para una aceptabilidad del 80%. El cálculo se realiza mes a mes, utilizando la temperatura media mensual de la localidad:

$$T_{up} = 0,31 T_{MediaMensualExt} + 17,8 + \frac{1}{2} \Delta T_{80\%} \quad (1)$$

donde:

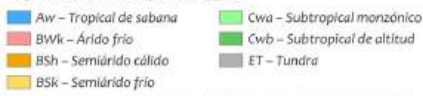
$T_{MediaMensualExt}$: temperatura media mensual exterior, calculada como el promedio de las temperaturas horarias a lo largo de un mes

$\Delta T_{80\%}$: banda de confort para un 80% de aceptación ($\Delta T_{80\%}=7^{\circ}C$)

Tipos de clima de Salta



Tipos de clima según Köppen



Fuente: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Nature Science Data. Beck, H.E., Zimmermann, J.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E.F.

Temperaturas mínimas y máximas medias

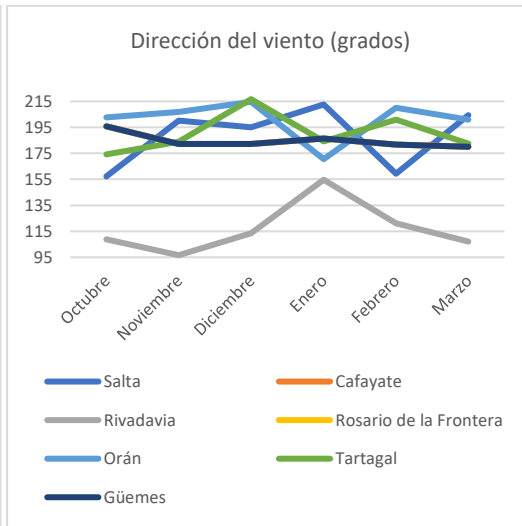
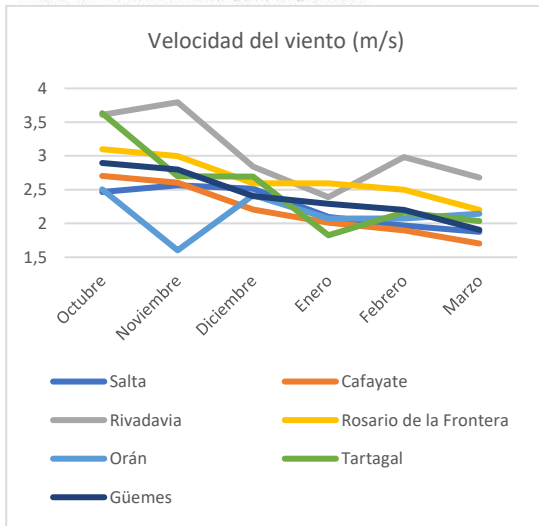
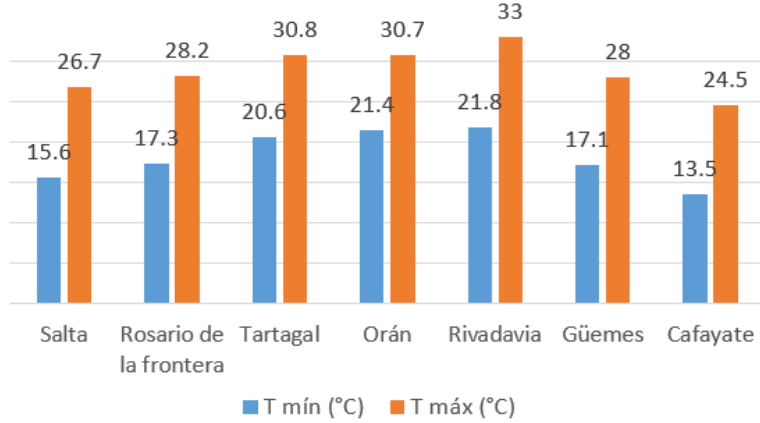


Fig. 1. Izquierda Arriba: ubicación de las localidades estudiadas en el diagrama climático de Köppen-Geiger. Fuente: Beck et al. (2018). Derecha Arriba: temperatura media máxima y mínima de las localidades, para los meses del periodo cálido octubre-marzo. Izquierda Abajo: velocidad del viento de las localidades, para los meses del periodo cálido octubre-marzo. Derecha Abajo: dirección del viento en grados, para los meses del periodo cálido octubre-marzo. Fuente de los últimos tres gráficos: elaboración propia a partir de datos del SMN.

En caso en que la temperatura T_{up} estimada con la Eq. (1) exceda los $27^{\circ}C$, se toma como límite superior este valor, el cual se considera el límite de la zona de confort.

Para la temperatura de bulbo seco mínima (T_{low}), se establece un valor de $12,8^{\circ}C$, correspondiente a la Temperatura de aire más baja especificada en ASHRAE 55 para evitar el desconfort térmico). El límite superior para punto de rocío es $17^{\circ}C$ (también sugerido en ASHRAE 55 y utilizado por Chen *et al.*, 2017). Esta temperatura se limita para controlar la humedad, debido que para climas con altos porcentajes de humedad esta estrategia de ventilación no funciona.

La velocidad máxima permitida en interiores ($u_{in,máx}$) es de $0.8m/s$, de acuerdo con el estándar 55 de ASHRAE. Esta se relaciona con la velocidad exterior y con el alto de las aberturas, mediante la siguiente ecuación:

$$u_{in,m\acute{a}x} = \sqrt{C_1 u_{out,up}^2 + C_2 h \Delta T_{m\acute{a}x} + C_3} \quad (2)$$

donde:

h: altura vertical de la abertura

$\Delta T_{m\acute{a}x}$: diferencia máxima de temperatura horaria que puede haber entre el interior y el exterior durante horas de NV, que se aproximan como la diferencia entre T_{up} y T_{low} .

$C_1 = 0,001$ es el coeficiente de velocidad del viento

$C_2 = 0,0035 \text{ m/s}^2\text{K}$ es el coeficiente de flotabilidad

$C_3 = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ es el coeficiente de turbulencia

Los valores de C_1, C_2, C_3 fueron determinados experimentalmente por Phaff (1980). Entonces, para determinar un límite superior para la velocidad del exterior, se utilizó la ecuación anterior para calcular la velocidad máxima exterior admitida $u_{out,up}$. En caso en que dicha velocidad supere los 13,8 m/s, se toma este valor como límite máximo.

Resumiendo, cuando en una hora determinada la temperatura de bulbo seco se encuentra entre T_{up} y T_{low} , la temperatura de bulbo húmedo es mayor a 17°C y la velocidad de viento es menor a $u_{out,up}$ m/s simultáneamente, se considera que en esa hora existe potencial para realizar ventilación natural. El cálculo se realiza para todas las horas del año y luego se cuenta la cantidad de horas NV (por mes y anual) en que se puede utilizar la ventilación natural. También es usual definir el potencial de ventilación CPNV como un porcentaje del número total de horas del año (o del mes):

$$CPNV = \frac{\sum_{i=1}^n h_{NV,i}}{h_{tot}} \quad (3)$$

$h_{NV,i}$ será igual a 1 si las condiciones en la hora i -ésima del año (o mes) coinciden con los criterios propuestos y 0 si no los cumple.

Efectividad de ventilación natural de un edificio (NVE)

Para evaluar el potencial de ventilación natural de un edificio dado, se puede utilizar la efectividad de ventilación natural definida por Yoon *et al.* (2020). Esta métrica compara el flujo de aire horario del edificio ACH_{avail} con el flujo de aire requerido para compensar las cargas necesarias de refrigeración y ventilación ACH_{req} . La relación entre estas dos tasas de flujo α es sumada para las horas en las que se realiza la simulación y dividida por el total de horas (n), resultando:

$$NVE = \frac{\sum \alpha}{n} \quad (4)$$

donde:

$\alpha = 1$ si $ACH_{avail} \geq ACH_{req}$ o $ACH_{req} = 0$

$\alpha = ACH_{avail}/ACH_{req}$ en los casos restantes

ACH_{avail} es la cantidad de cambios de aire por hora que pueden darse a través de las aberturas, ACH_{req} es la cantidad de recambios de aire por hora necesarios y n es el número de horas totales del período de simulación. Esta ecuación funciona sólo para condiciones de estado estacionario, el valor de ACH_{req} se toma de una simulación previa de energía. La NVE es útil para investigar el diseño de los componentes de un edificio, ya que esta métrica es influenciada tanto por el clima como por los materiales del edificio, la configuración de sus ventanas, ganancias internas, ganancias solares, el tamaño de las habitaciones, etc. Sin embargo, la NVE posee dos limitaciones, una es que ésta depende de los resultados obtenidos de una simulación previa, entonces los efectos de tener distintas opciones para los componentes anteriormente mencionados de un edificio, se observan únicamente luego de realizar dichas simulaciones. La segunda es que funciona sólo para casos de estado estacionario, de modo que no es posible tener en cuenta el efecto de la masa térmica de un edificio, pues este efecto es dinámico. Para resolver estas desventajas Nari Yoon *et al.* (2020) introduce una nueva métrica, la Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural (por sus siglas en inglés NVCE), ésta cuenta con una ecuación

explicita para calcularla, es decir, ya no depende de simulaciones previas, puede trabajar con estados transitorios, haciéndose posible la inclusión de los efectos de la masa térmica de un edificio, poniendo especial foco en las posibilidades de utilizar la ventilación como herramienta para el enfriamiento. En un rango de 0 a 1, la NVCE mide la efectividad del enfriamiento por ventilación natural como recurso en un paso de tiempo. Para un solo paso de tiempo se define como:

$$NVCE_{ts} = \frac{q_{avail}}{q_{req}} \quad (5)$$

donde:

q_{avail} : es el potencial de enfriamiento disponible a través de la ventilación natural

q_{req} : es el potencial requerido para que la temperatura interior pase a un valor deseado de temperatura

A diferencia de la NVE anterior, la NVCE utiliza potenciales de enfriamiento en lugar de recambios de aire por hora, para considerar casos transitorios de forma más conveniente. La NVCE de una determinada duración se define como el promedio de cada una de las NVCE de cada paso temporal:

$$NVCE = \frac{\sum_{n_{ts}} NVCE_{ts}}{n_{ts}} \quad (6)$$

donde n_{ts} es el número de pasos temporales del período de simulación, por ejemplo, para un período de un año con un paso temporal de una hora $n_{ts} = 8760$. Si el q_{avail} no es suficiente como para alcanzar la temperatura interior deseada, debe haber un potencial de calor suplementario. Se puede definir al q_{req} como la suma del q_{avail} más q_{sup} , entonces:

$$NVCE_{ts} \equiv \frac{q_{avail}}{q_{avail} + q_{sup}} \quad (7)$$

Trabajaremos con la siguiente ecuación, incluyendo la definición del calor disponible se tiene:

$$NVCE_{ts} \equiv \frac{-\rho c \dot{V}_{avail} (T_{target} - T_{out})}{q_{req}} \quad (8)$$

donde:

ρ : densidad del aire

c : calor específico del aire a presión constante

\dot{V}_{avail} : razón de flujo de aire interior a través de ventilación natural, obtenido por simulaciones, cálculos o medidas

T_{target} y T_{out} : son la temperatura deseada y la exterior respectivamente.

En síntesis, la NVCE representa la fracción de capacidad de enfriamiento que puede proveer la ventilación natural, comparada con la capacidad requerida para alcanzar la temperatura interior deseada.

Si bien el estudio de Nari Yoon *et al.* (2020) continúa con ecuaciones para las temperaturas que ayudan a tener en cuenta el efecto de la masa térmica, desde este punto se propone utilizar simulación computacional en estado transitorio para encontrar los valores de \dot{V}_{avail} y q_{sup} . Para ello, se utilizará EnergyPlus y su interfaz gráfica Open Studio.

Descripción de la vivienda a utilizar

Se seleccionó para el estudio una vivienda social previamente estudiada por Flores y Filippín (2021), del barrio Santa María de las Pampas, ubicado al noroeste de la ciudad de Santa Rosa, en la Pampa. El mismo fue construido por el Instituto Provincial de Vivienda en 2007.

Cada casa presenta dos habitaciones, un living comedor con cocina y un baño, con una superficie total de 50,74 m². La disposición se puede observar en la Figura 2. El volumen de la habitación 1 es de 28,08 m³, el de la habitación 2 es de 25,69 m³ y el del sector cocina-living es de 57,75 m³. En este barrio las casas fueron construidas de a pares, compartiendo una pared, como vemos en la Figura 2, de modo que la casa lindera será tenida en cuenta para las simulaciones a realizarse posteriormente. Las

especificaciones de materiales y sus propiedades térmicas (conductividad, calor específico, densidad y color de la superficie) de cada capa en las paredes, pisos y techos se muestran en la Tabla 1.



Figura 1: Plano y perfil de la vivienda

Tabla 1: Propiedades térmicas de los materiales de construcción de la vivienda estudiada.

Elemento de la vivienda	Capa (desde el exterior)	Color de acabado de pintura	Conductividad Térmica (W/mK)	Transmitancia térmica (W/m ² K)	Calor Específico (J/kg K)	Densidad (kg/m ³)		
Paredes exteriores	Revoque (0.2 m)	Blanco	1,16	1,47	1085	1800		
	Ladrillo cerámico hueco (0.18 m)		0,38				835	1920
	Revoque (0.2 m)		1,16				1085	1800
Paredes interiores	Revoque (0.2 m)	Blanco	1,16	1,76	1085	1800		
	Ladrillo cerámico hueco (0.12 m)		0,33				835	1920
	Revoque (0.2 m)		1,16				1085	1800
Techo	Techo metálico (1.5 mm)	Verde	45	0,44	870	8800		
	Lana mineral (38 mm)		0,04				700	51
	Cámara de aire		0,28				2805	400
	Madera de pino (19 mm)							
Ventanas	Vidrio transparente simple (4 mm)	Carpintería blanca	0,9	5,82	750	2500		
	Carpintería de aluminio con persianas							
Puertas	Puertas metálicas	Blanco	45	5,77	870	2700		

Las paredes de la envolvente de este edificio, las paredes interiores y el piso no incluyen aislación térmica, como es usual en Argentina. Las capas constructivas del piso son 0,10 m de espesor de contrapiso de hormigón con agregado pétreo y un acabado de baldosas cerámicas. El techo metálico

incluye 3 mm de lana mineral como aislación térmica y el acabado es una pintura verde. Las ventanas poseen vidrio simple con carpintería de aluminio.

Simulación con EnergyPlus

Con el objetivo de conocer el potencial de ventilación natural de la vivienda descrita anteriormente, se utilizó la métrica $NVCE_{ts}$. Para ello se simuló la construcción con el software EnergyPlus y su interfaz gráfica Open Studio, al cual se le cargaron los datos climáticos de la localidad correspondiente (año típico meteorológico en formato EPW), el diseño de la vivienda realizado en Sketch Up, y las propiedades térmicas y dimensiones de los materiales de construcción de la Tabla 1. Se consideró que las ventanas pueden abrirse entre las 19hs y las 7hs, siempre que la temperatura exterior esté al menos 2°C por debajo de la temperatura interior y no sea mayor que 27°C o menor a 16°C . Se utilizó el módulo "Zone Ventilation Wind and Stack". Se seleccionaron como variables de salida la temperatura en cada zona y las renovaciones horarias de aire. También fue necesario definir un termostato a la temperatura T_{target} , que se eligió en 24°C , para encontrar la potencia necesaria para llevar la temperatura del interior a la temperatura deseada (q_{req}). Con estos datos es posible calcular las $NVCE_{ts}$ mediante la Ec. (8).

Es necesario aclarar que los resultados de las simulaciones sirven para comparar resultados entre los casos de estudios, y no como valores absolutos; ya que para ello sería óptimo ajustar el modelo físico de las simulaciones con datos reales medidos in-situ.

RESULTADOS

Evaluación del potencial de horas de ventilación natural

En la Fig. 3 se observa que en Salta se pueden aprovechar 4836 horas de ventilación natural, es decir, más de la mitad de las horas totales del año (8760). Climas como el de Rivadavia, Orán o Tartagal no se ven muy favorecidos para utilizar este método, pues cuentan con 3271, 3320 y 3457 horas respectivamente, debido principalmente a que son climas cálidos y húmedos, en los cuales la temperatura de bulbo húmedo en muchos horarios supera los 17°C y la temperatura de bulbo seco es mayor que la T_{up} calculada. La ciudad de Cafayate, por el contrario, presenta un clima seco, con temperaturas no tan altas, por lo que presenta un buen valor de horas NV, con 4857 es la ciudad de la provincia con las mejores condiciones estudiadas anualmente.

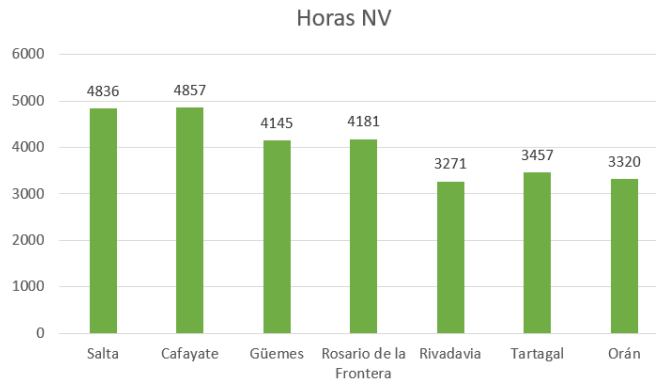


Figura 2: Horas de NV anuales para distintas localidades estudiadas.

Se seleccionaron las ciudades de Salta, Cafayate y Rivadavia para realizar un análisis más profundo y calcular la eficiencia de la ventilación natural en la vivienda social durante los meses de altas temperaturas. Para ello, se tomaron únicamente los meses cálidos (octubre a marzo), en los cuales se podría utilizar la ventilación natural para refrescar los ambientes y se calculó la cantidad de horas de ventilación para cada uno de los meses. La Figura 4 resume los resultados obtenidos. Se observa que, para la ciudad de Salta, octubre es el mes con la mayor cantidad de horas aprovechables, contando con 570 horas de NV de las 744 que posee el mes (casi un 77%), debido a que presenta menores temperaturas que en el resto de los meses, con buenas velocidades de viento y porcentajes bajos de humedad. En febrero se presenta un cambio grande en las horas de NV disponibles, siendo el mes con menos horas de NV aprovechables, pues se cuenta con 181 de sus 672 (~27%), esto se debe a que la temperatura y sobre todo los porcentajes de humedad de la ciudad aumentan en gran medida en estas épocas, subiendo la temperatura de bulbo húmedo y reduciendo el uso de ventilación natural como estrategia viable.

Rivadavia presenta este mismo problema en los meses analizados, si bien octubre alcanza las 347 horas (~47% del tiempo), estas horas decaen y en febrero sólo posee 72 horas aprovechables (~11%), aquí el clima demasiado húmedo supera el límite de temperatura de bulbo húmedo, presentando varios intervalos aledaños al medio día solar en los que se supera el límite de temperatura de T_{up} . Por el contrario, Cafayate con su clima seco a lo largo de toda la temporada, permite contar con grandes cantidades de horas de NV aprovechables, su mejor mes es diciembre con 564 horas (~75 %), el mes que cuenta con menos horas de NV es febrero, con 436 (un 65%) que sigue siendo una buena cantidad de horas de NV.

En resumen, los valores muestran que el total de horas que se puede aprovechar mensualmente se ve considerablemente afectado por los porcentajes de humedad que haya en el ambiente, esto se puede apreciar por como bajan los valores de la ciudad de Salta en los meses de lluvia, de diciembre a febrero, mientras que en climas como el de Cafayate, que es seco, el total de horas CPNV se sostiene relativamente constante, con valores casi siempre mayores a los de la ciudad de Salta. Por último, en climas como el de Rivadavia, continuamente húmedos las horas de CPNV no son suficientes para aplicar esta estrategia, además sus altas temperaturas en los meses de diciembre a marzo dificultan aún más las condiciones de esta localidad, de modo que este tipo de refrescamiento pasivo no es suficiente.

Finalmente, se tomó el mes con mayor potencial de ventilación de Salta (octubre) y se realizó un análisis horario, para conocer si las horas en las que se puede aprovechar la ventilación natural coinciden con el horario nocturno. Considerando únicamente las horas de 19 a 7, se obtuvo que 322 son útiles para NV, un porcentaje muy alto, teniendo en cuenta que bajo estas suposiciones de medio ciclo el total sería de 372 horas nocturnas en el mes, pudiendo aprovecharse aproximadamente el 86 % de las mismas.

De este análisis se puede concluir que el clima de la ciudad de Salta es apto para aplicar estrategias de ventilación nocturna, por las condiciones de saltos de temperatura en sus ciclos diurnos, la velocidad del viento y los porcentajes de humedad que presenta en el ambiente.

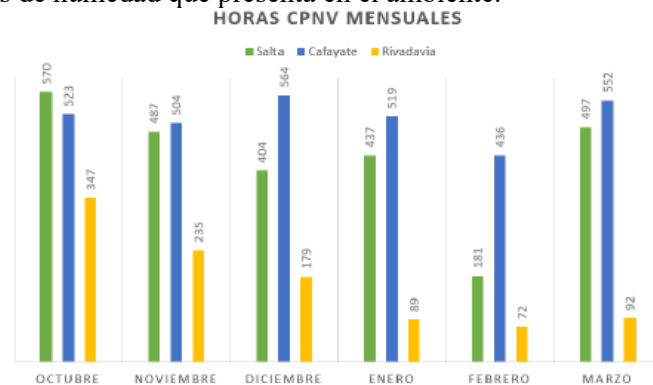


Figura 3: Horas de CPNV de los meses de octubre a marzo de Salta, Cafayate y Rivadavia.

Evaluación de la Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural – NVCE

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos de la cantidad de horas con NVCE=1 en el periodo octubre-marzo para cada zona de la vivienda en Salta, Cafayate y Rivadavia. Se toman solamente las horas en que NVCE=1, es decir, aquellas horas en las que la ventilación natural podría cubrir completamente la necesidad de refrigeración. El caso de NVCE <1 correspondería a horas en que se requiere de refrigeración convencional adicional para alcanzar el confort, lo cual sería incompatible con mantener una ventana abierta para permitir la ventilación.

Se observa en la Tabla 2 que el mayor número de horas con ventilación natural efectiva corresponde a Cafayate y el menor es de Rivadavia. También es notoria la diferencia de horas entre la Cocina-Living y la Habitación 2 en la ciudad de Salta, debido a las características particulares de dirección y velocidad del viento en este lugar.

Tabla 2: Resultados de la cantidad de horas con NVCE = 1 para el periodo octubre-marzo.

	Total de horas con NVCE=1		
Zona/Localidad	Salta	Cafayate	Rivadavia
Cocina-Living	588	806	420
Habitación 1	699	823	391
Habitación 2	738	775	437

La Figura 5 compara los porcentajes de horas con potencial de ventilación natural (CPNV) y los porcentajes de horas con NVCE de las zonas Cocina-Living y Habitación 1 de la vivienda, mes a mes en cada localidad.

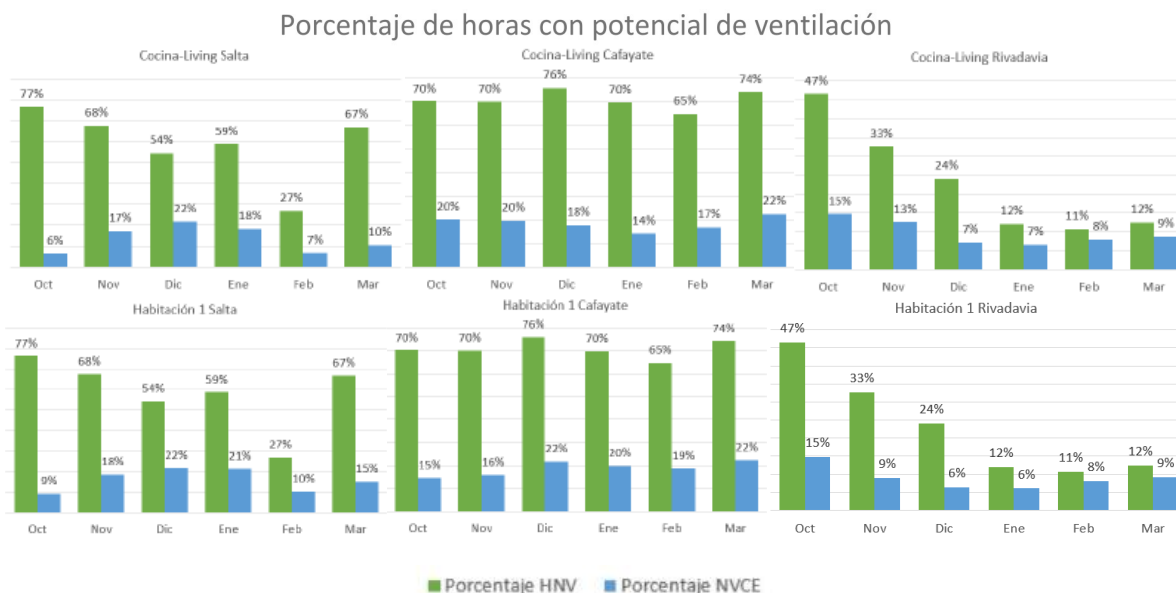


Figura 4: Porcentaje de horas de CPNV (en verde) y Efectividad de Enfriamiento de la Ventilación Natural NVCE (en azul) de los meses de octubre a marzo en Salta, Cafayate y Rivadavia, para la Cocina-Living y Habitación 1.

En la ciudad de Salta, la zona con los porcentajes más bajos es la Cocina-Living. Ésta es la única zona que presenta dos ventanas y por lo tanto la única que cuenta con ventilación cruzada. Se podría esperar que la zona presente mejores valores, pero hay que tener en cuenta que es también la zona de mayor volumen, por lo que es más difícil realizar recambios de aire por hora en la misma. Para las dos zonas (Cocina-Living y Habitación) se puede observar que octubre, el mes con mejor potencial de CPNV, presenta los menores porcentajes de horas aprovechables en la vivienda. Esto podría deberse a que es el mes con mayores ganancias de energía solar por ventanas (dato corroborado por las simulaciones en EnergyPlus), encontrándose también que la zona con más ganancias es la de Cocina-Living de la vivienda. Ambos motivos explican los porcentajes más bajos de NVCE. Asimismo, analizando las direcciones de los vientos se observa que en octubre se tiene viento proveniente del sureste con temperaturas iguales o superiores a 24°C y velocidades de 10 m/s, que puede afectar a la ventana sur del living. Por último, notamos que en las dos zonas el mejor mes es diciembre, seguido de enero, puesto que en estos meses la ganancia solar por las ventanas disminuye considerablemente y la ventilación natural es más efectiva para reducir la temperatura interior.

En Cafayate, en la mayoría de los casos, se superan los porcentajes de Salta. Para ambas zonas el mejor mes es diciembre y el peor es octubre. Es interesante observar cómo el clima ofrece muy buenas condiciones para ventilación en este mes, que resulta ser el peor, al no poder ser aprovechadas dichas condiciones por la vivienda. Al comparar las condiciones de los meses de octubre y diciembre, se encontró que en la Habitación 1 la ganancia solar por ventanas es mayor en octubre, debido a la orientación norte de la ventana y a la menor altura solar. Esto ocasiona menores valores de horas con NVE. En las zonas restantes las ganancias son similares, pero al comparar sus flujos de aire en el interior, en diciembre se producen casi el doble de recambios por hora que en octubre dentro de la vivienda. Esto

puede deberse a que en diciembre hay una mayor cantidad de horas de viento proveniente del sur y el este, con velocidad algo superior, pudiendo generar mejor ventilación.

Rivadavia es la ciudad con menor cantidad de NVCE de los tres sitios estudiados, lo cual se debe en gran medida a que la temperatura exterior supera la T_{target} de 24°C en muchas horas del periodo. Octubre es el mejor mes para las tres zonas, mientras que enero es el peor, a la par de diciembre. Enero posee una mayor cantidad de horas con temperatura exterior superior a 27°C, límite superior tomado para poder ventilar el interior, lo cual explica su menor cantidad de horas NVCE.

CONCLUSIONES

Luego de recopilar información sobre ventilación natural, analizar los datos arrojados por simulación computacional mediante EnergyPlus para cada sitio, calcular el total de horas de CPNV para las siete localidades y observar los resultados de la cantidad de horas con NVCE en Salta, Cafayate y Rivadavia, se puede concluir que las localidades demasiado cálidas y húmedas como Orán, Tartagal o Rivadavia no son aptas para la aplicación de métodos de refrescamiento pasivo por ventilación natural, pues la cantidad de horas que con la que cuentan para aplicar el método (entre 3270 y 3460) no son suficientes. Climas con menores porcentajes de humedad como el de Salta o incluso más seco como el de Cafayate se ven favorecidos por esta condición y por sus temperaturas más bajas, pudiendo devolver una mayor cantidad de horas aprovechables de CPNV. Aun así, en estos dos últimos sitios al analizar la efectividad de la ventilación nocturna en el interior de la vivienda social, los porcentajes de horas aprovechables bajan en una gran medida, entre 71% y 17% en Salta y 57% y 46%, resaltando la importancia de un buen diseño para este tipo de construcciones, más aún en el contexto global que nos encontramos. En base a lo observado se sugiere estudiar en el futuro la mejora de la ventilación natural del hogar a través del correcto dimensionamiento y ubicación de las aberturas, complementando con extracción activa del aire de ser necesario, además analizar la posibilidad de adicionar masa térmica a los muros de la envolvente para estudiar su impacto y sus posibles mejoras en el confort térmico del interior.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Universidad Nacional de Salta (Proyecto CIUNSA A2489), a la Fundación Williams y a la Red Iberoamericana de Eficiencia y Salubridad En Edificios (IBERESE) de CYTED (<https://www.cytcd.org/node/13398>) por el financiamiento y soporte a las actividades realizadas en este trabajo.

REFERENCIAS

- ASHRAE, Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), DOI:10.1038/sdata.2018.214.
- Camilloni, I. A. (2018). Argentina y el cambio climático. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. Recuperado julio 20, 2023, a partir de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/99889>
- Cardinale N., M. Micucci, F. Ruggiero. (2003). Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian building, *Energy Build.* 35 153–159, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00024-5).
- de Dear, R. J., y Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, Special Issue on Thermal Comfort Standards, 34(6), 549-561.
- Flores, S., y Filippín, C. (2021). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231, 110576.
- Li W., S. Wang (2020). A multi-agent based distributed approach for optimal control of multi-zone ventilation systems considering indoor air quality and energy use. *Appl Energy*, 275 (2020), Article 115371.

- Liu T., W.L. Lee (2020). Influence of window opening degree on natural ventilation performance of residential buildings in Hong Kong, *Science and Technology for the Built Environ*, 26 (1) (2020), pp. 28-41.
- Oropeza-Perez I., Poul Alberg Østergaard (2014). Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions—A case study of Mexico, *Applied Energy* 130, 2014, Pages 20-32, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.035>.
- Rawat N., P. Kumar (2023). Interventions for improving indoor and outdoor air quality in and around schools. *Sci Total Environ*, 858, Article 159813
- Su W., Zhengtao Ai, Jing Liu, Bin Yang, Faming Wang. (2023). Maintaining an acceptable indoor air quality of spaces by intentional natural ventilation or intermittent mechanical ventilation with minimum energy use, *Applied Energy*, Volume 348, 121504, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121504>.
- Yao R., B. Li, K. Steemers, A. Short. (2009). Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China, *Renew. Energy* 34 (12) 2697e2705.
- Yoon, N., Norford, L., Malkawi, A., Samuelson, H., & Piette, M. A. (2020). Dynamic metrics of natural ventilation cooling effectiveness for interactive modeling. *Building and Environment*, 180, 106994.

DIAGNÓSTICO DEL NIVEL DE SENSIBILIZACIÓN AMBIENTAL DE UNA COMUNIDAD ESCOLAR

Alción Alonso Frank,¹ Celina Bustos¹, Guillermina Ré¹

¹Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan (IRPHa-CONICET-UNSJ).

Tel.: +54(0)264 423 2395 / 3259 Int. 318 - <http://www.irpha.faud.unsj.ar>

E-mails: afrank@faud.unsj.edu.ar, bustoscelina@faud.unsj.edu.ar, guillerminare@faud.unsj.edu.ar.

RESUMEN: El crecimiento de la población y el avance económico e industrial conseguido durante el último siglo ha estado acompañado de una degradación ambiental que pone en peligro la disposición de recursos finitos y las condiciones necesarias para la supervivencia humana. En este marco, los establecimientos escolares cumplen un rol esencial por su posibilidad de concientizar tanto a estudiantes como al personal docente, administrativo y de mantenimiento, sobre la importancia del cuidado del ambiente. En esta línea, el presente trabajo tiene por objetivo realizar un análisis y calificación del comportamiento de los cuatro estamentos que conforman la población de un edificio escolar del Área Metropolitana de San Juan, Argentina. Para su alcance, se diseña el Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar y se evalúa a la misma en lo relativo a la conciencia ambiental, el uso de la energía eléctrica, el gas, el agua y acciones de reciclado. De los resultados obtenidos se destaca que el caso de estudio presenta un desempeño ambientalmente sustentable. Se concluye que la herramienta de calificación propuesta representa un aporte en materia de concientización del cuidado de los recursos y se destaca la posibilidad de ser replicada a otras comunidades educativas.

Palabras clave: escuela, índice, sustentabilidad ambiental, concientización.

INTRODUCCIÓN

Los últimos tiempos han estado caracterizados por la producción mundial intensiva, exhaustiva, poco racional, carente de regulaciones y responsabilidad, lo cual ha generado serios problemas al ambiente, que continúan teniendo efectos destructivos sobre el planeta. En esta línea, el concientizar a la población y dar respuesta a la problemática, es uno de los desafíos de la época actual. Asimismo, la implementación de acciones de mitigación y adaptación han tomado relevancia, basadas en los criterios de sustentabilidad ambiental.

Desde la perspectiva de las políticas internacionales, se ha insistido en fomentar la destreza que tiene una sociedad para hacer un uso consciente y responsable de sus recursos, sin agotarlos o exceder su capacidad de renovación. En este sentido, el término desarrollo sustentable fue utilizado por primera vez en 1987 como crítica a un modelo económico globalizador, irracional e invasivo del ambiente (Brundtland, 1987). En la actualidad, la toma de decisiones que permitan aumentar o mejorar los niveles de sustentabilidad, son fundamentales para el desarrollo social y económico de un país.

En este contexto, se destaca la necesidad de educar en criterios de sustentabilidad y reforzar la concientización sobre el cuidado del ambiente, utilizando la comunicación visual como medio. Por lo expuesto, los edificios escolares se reconocen como espacios de gran potencial, al ser ámbitos destinados al desarrollo de los procesos de enseñanza – aprendizaje, lo cual resulta un recurso a ser aprovechado a favor de generar conciencia ambiental.

En lo referido al diagnóstico ambiental en diferentes tipos de comunidades, son variadas las metodologías dirigidas a contribuir en la solución o mitigación de dicha problemática (Gómez Soto, 2020; Merino Remón, et al., 2018; Martínez Bernal et al., 2017; García Rodríguez, 2006). Antecedentes en la temática señalan a los diagnósticos como una instancia necesaria para la elaboración de proyectos educativos o programas de actividades en torno a la educación ambiental. Los resultados de la implementación de estas metodologías en escuelas, permiten la obtención de datos respecto a la

percepción que tienen los estudiantes, sus concepciones y el nivel de conocimiento en la materia (Pachay Loor et al., 2021).

Siguiendo este lineamiento, los autores (Linares Guerra et al., 2021) desarrollan una metodología investigativa que puede ser utilizada en proyectos del campo de la gestión ambiental. Dicha herramienta práctica y educativa permite la preparación en investigación de sus actores, a partir de etapas ordenadas y dependientes. La misma está encaminada a contribuir a la sostenibilidad de la comunidad y contribuye a nivel local en la toma de decisiones para su bienestar ambiental.

En este sentido, se destaca a la encuesta como uno de los instrumentos de investigación cuantitativa para la recolección de datos más utilizado por profesionales del campo académico (López Roldán y Fachelli, 2015). Los resultados que alojan podrían variar en función de las características de los encuestados, como así también se diferencia en el trabajo de campo y el conocimiento de la temática (Castañeda y Luque, 2004). El propósito de la misma, como herramienta metodológica, es según García (1993) la de obtener información relativa a las características predominantes de una muestra mediante la aplicación de cuestionarios como proceso de interrogación y registro de datos, donde se puede conseguir información referida a un tema, asunto o situación.

La presente investigación se enmarca en el proyecto CICITCA 2023-2024 titulado “Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental para escuelas. Aplicación en casos de estudio del Área Metropolitana de San Juan” (Ré y Alonso Frank, 2023). Dicha herramienta, denominada MECSA, contempla las particularidades de la tipología escolar y se orienta a la evaluación, mejoramiento y seguimiento de edificios escolares existentes que aspiren a alcanzar determinados niveles de sustentabilidad ambiental y eficiencia energética (Ré y Bianchi, 2020). La estructura metodológica está conformada por cinco categorías, entre las cuales “Comunidad” considera al grupo humano dentro del ámbito escolar y en su entorno inmediato. En referencia al recorte social, la comunidad educativa que funciona dentro del edificio escolar está integrada por alumnos, docentes, administrativos y personal de maestranza o mantenimiento.

La base conceptual de esta categoría considera que el éxito de la implementación de planes de mejoramiento de la infraestructura edilicia y de programas de sustentabilidad requiere del compromiso de todos los usuarios. La voluntad por el cuidado del propio espacio, la educación, el entrenamiento y la motivación de las partes involucradas son factores necesarios para que los resultados alcanzados se sostengan en el tiempo.

A partir de lo expuesto, este trabajo tiene como objetivo analizar y evaluar el nivel de sensibilidad en materia del cuidado del ambiente, utilizando un Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar (ISACE), desarrollado a tal efecto. De esta manera, se obtiene un diagnóstico que contribuye en la etapa de auditoría a llevarse a cabo en el proyecto de investigación de referencia. Asimismo, permite la elaboración de pautas de comunicación para ser implementadas en mensajes de concientización.

METODOLOGÍA

La presente investigación responde al método científico con enfoque cuantitativo, producto de emplear la recolección de datos objetivos y subjetivos, su procesamiento y análisis con software estadístico avanzado SPSS (del inglés Statistical Package for Social Sciences), que significa Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales, desarrollado por IBM. Como herramienta metodológica se emplea una encuesta en línea diseñada por Bustos, Re y Alonso Frank 2 (2022) en la plataforma de Formularios de Google. La misma permite obtener información de los cuatro estamentos que conforman el Colegio Central Universitario "Mariano Moreno" emplazado en el Área Metropolitana de San Juan, en materia del cuidado del ambiente, la energía eléctrica, el gas, el agua y el reciclado. Cabe resaltar que la narrativa de la encuesta difiere en cada estamento. Con respecto al enunciado de las preguntas, se persigue que sean breves, sin ambigüedades y gramaticalmente correctas, evitando utilizar lenguaje técnico.

En la etapa de trabajo de campo, se seleccionan delegados de los estamentos educativos previamente mencionados. Es así que, para cada uno de ellos existe una persona a cargo, cuya función es la de difundir y distribuir las encuestas online con un link a través de Whatsapp. Por su parte, cabe destacar que la comunicación y difusión de las mismas se refuerza con la instalación de un flyer institucional en diferentes sectores del edificio escolar (Martínez, 2022). Como complemento, se implementa un código QR para cada estamento como estrategia de comunicación, ya que se considera que las personas encuestadas están vinculadas a la información de manera virtual y a través de teléfonos móviles, en cualquier lugar y momento. De esta manera se busca activar la difusión entre usuarios del

establecimiento educativo, utilizando las tecnologías QR como herramienta de difusión. De este modo, se rescata el uso de las nuevas tecnologías, las cuales contribuyen a una mayor difusión de información, haciendo su acceso más inclusivo, colaborando en la comunicación.

En base a los resultados obtenidos y el diseño del Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar (ISACE), se procede a evaluar el comportamiento de la comunidad escolar en términos del cuidado del ambiente, la energía eléctrica, el gas, el agua y el reciclado.

Caso de Estudio

El Colegio Central Universitario "Mariano Moreno" (CCU), inaugurado en 1965, es una institución de educación secundaria de tipo preuniversitaria, perteneciente a la Universidad Nacional de San Juan y emplazada en el Área Metropolitana de San Juan, Argentina. El mismo se caracteriza por su modalidad de evaluación cualitativa e integrativa y por propiciar la comunicación, promover la integración de lo aprendido a la vida cotidiana, favorecer la reflexión y el diálogo y cultivar actitudes de vida que requieran respeto, espíritu de servicio y conciencia ecológica (Colegio Central Universitario Mariano Moreno, 2023). En este sentido, el CCU ofrece a sus estudiantes la posibilidad de participar en actividades diversas, tales como los proyectos institucionales "Creando Acciones Solidarias", "Modelo de la ONU", "Proyecto PASCH, Colegios socios para el futuro" y "Rescate de Residuos Tecnológicos". En relación a la propuesta académica, posee Ciclos Orientados en Ciencias Naturales, en Humanidades y Ciencias Sociales y en Comunicación, Arte y Diseño.



Figura 1. Colegio Central Universitario "Mariano Moreno". Fuente: Fotografías propias, 2023.

Caracterización de la muestra

Del total de 132 encuestas practicadas en los cuatro estamentos del edificio CCU, el 71% se corresponde a estudiantes, el 12% a docentes, el 8,5% a administrativos y el 8,5% a maestranza. En relación al género, predomina el femenino (65%) en los cuatro estamentos. En lo relativo a las edades, destacan los 13 (25%) y 16 años (21%) en estudiantes, los 46-50 años (25%) en docentes, los 51-55 años (28%) en administrativos y los 20-29 (37%) y 60-69 años (36%) en maestranzas. En relación al máximo nivel educativo alcanzado de los docentes encuestados, el 6% posee un título terciario, el 50% universitario, el 25% especialización y el 19% maestría. En cuanto al de los administrativos, el 46% tiene título secundario, el 18% terciario y el 36% universitario. Por último, el 64% del personal de maestranza dispone de título secundario y el 34%, universitario.

Respecto al estamento alumnos, las respuestas obtenidas pertenecen a estudiantes que cursan 2° año en un 26%, 5° año en un 19% y 1°, 3° y 4° año en un 14%. El 13% restante corresponde a 6° año.

Análisis de los resultados de las encuestas

En referencia al término sustentabilidad ambiental, el 85% de los estudiantes expresa conocer el significado del mismo, el 6% no y el 9% NS/NC. A su vez, el 88% de los docentes y el 91% de los administrativos indica tener conocimiento, mientras que el 12% y el 9%, respectivamente, no lo hace. En cuanto a la frecuencia con la que realizan prácticas dirigidas a proteger el medio ambiente, el agua, la energía eléctrica y el gas, la Figura 2 exhibe los resultados por estamento. Del total, en lo referido al cuidado del medioambiente prevalecen "a menudo" y "rara vez" con un 45% y 25% respectivamente, mientras que en el cuidado del agua prevalecen "siempre" y "a menudo" con un 63% y 27%. Dichas valoraciones destacan igualmente para el cuidado de la energía eléctrica con un 36% y 33% y para el cuidado del gas con un 37% y 23%.

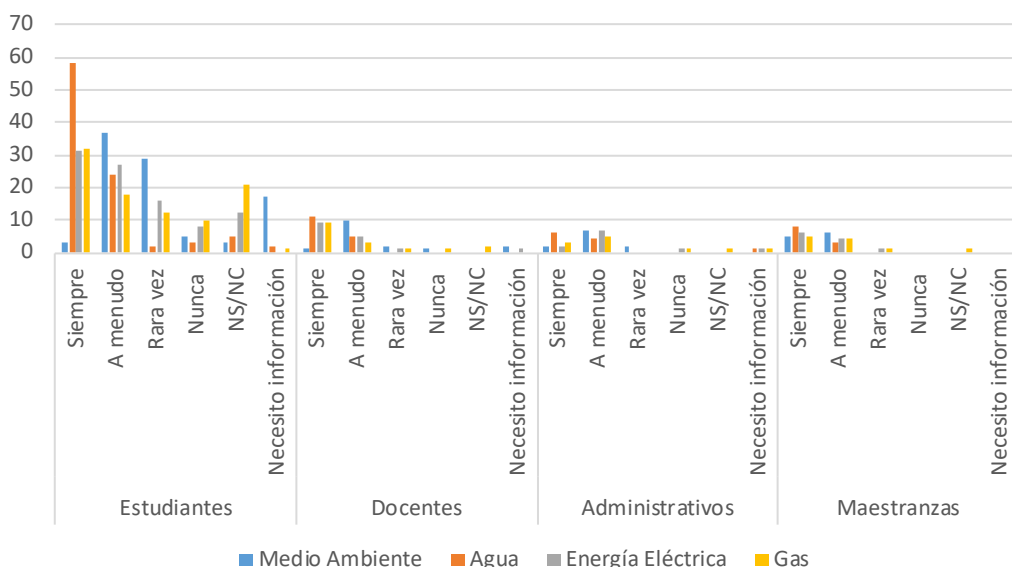


Figura 2. Frecuencia con la que realizan prácticas dirigidas a proteger el medio ambiente, el agua, la energía eléctrica y el gas. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Respecto a la motivación por ahorrar los recursos agua y energía eléctrica, la Figura 3 presenta los resultados por estamento. En ese sentido, se observa que “contribuir a mitigar la crisis local” es la mayor motivación para el cuidado y la racionalización en el uso del agua, con 27,5% del total de encuestados. Por su parte, la reducción del consumo de energía eléctrica, se asocia en primer lugar a “disminuir la contaminación” con un 29%, seguido de “ahorrar dinero en el pago de la factura” con un 18%.

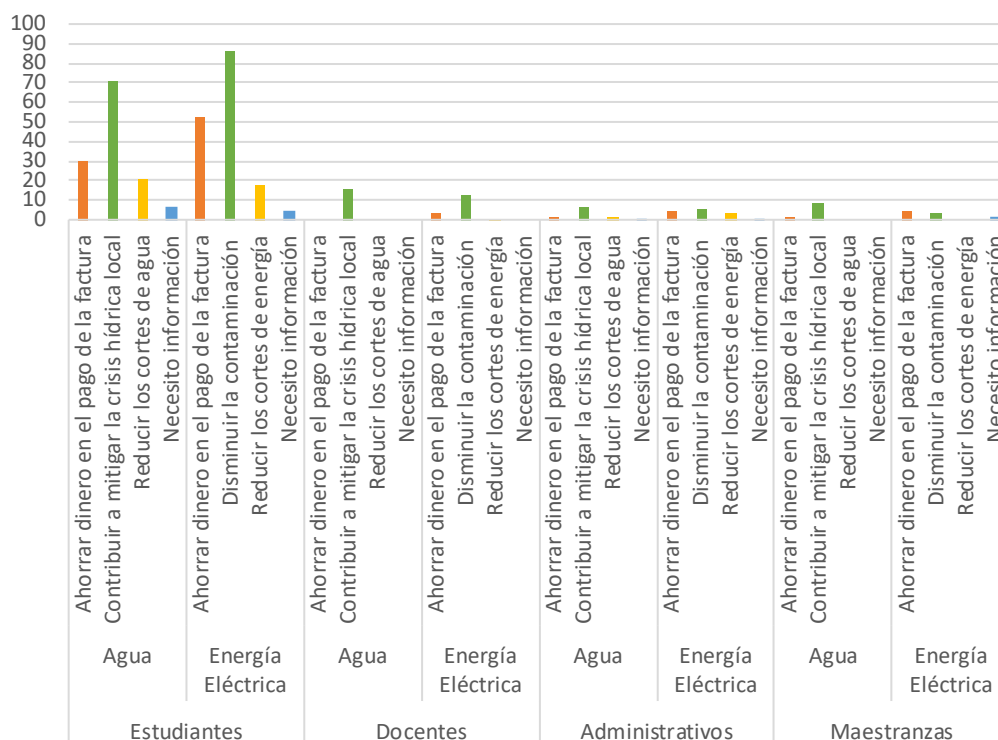


Figura 3. Motivación por la cual se ahorra el agua y la energía eléctrica. Fuente: Elaboración propia, 2023.

En lo relativo al encendido y apagado de la iluminación en el establecimiento educativo, la Figura 4 muestra los resultados por estamento del personal. Del total, se advierte que “siempre” realizan dichas

acciones es la mayor respuesta obtenida, con un 35%. Seguidamente, se corresponden “a menudo” con un 27% y nunca con un 21%.

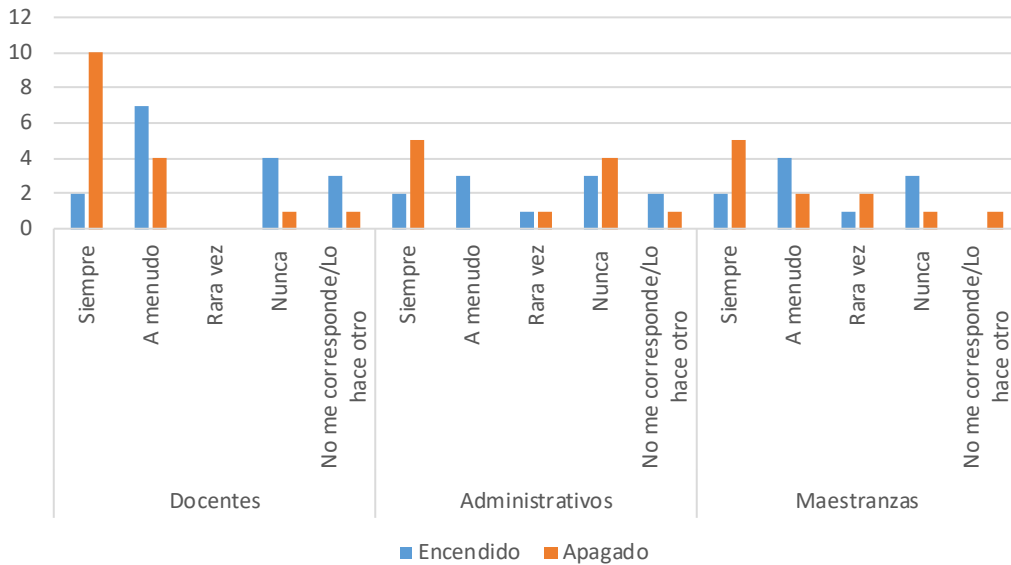


Figura 4. Encendido y apagado de la iluminación. Docentes, administrativos y maestranzas. Fuente: Elaboración propia, 2023.

En relación al uso de equipos electrónicos, predominan el celular, la computadora y la impresora. En menor medida se emplea la Tablet, el proyector, la fotocopiadora, el Smart TV, el equipo de audio y el parlante, entre otros. En lo referido a la desconexión de los aparatos eléctricos y cargadores en el establecimiento educativo, cuando no están en uso, la Figura 5 enseña los resultados por estamento, en donde se destaca, a nivel muestra, que “siempre” realizan dichas acciones es la mayor respuesta obtenida, con un 46%. Seguidamente, se corresponden “a menudo” con un 30%.

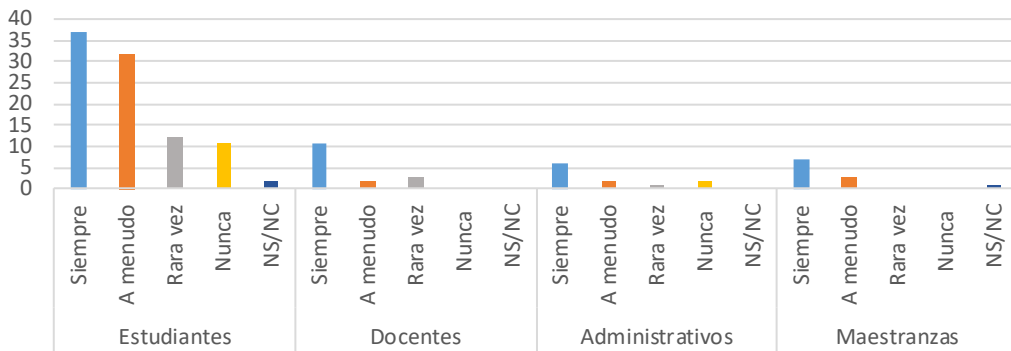


Figura 5. Desconexión de los aparatos eléctricos y cargadores cuando no están en uso. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Asimismo, en cuanto a la consulta sobre la frecuencia de reutilización o reciclado, la Figura 6 muestra los resultados por estamento, en donde se subraya, a nivel muestra, que “siempre” realizan dichas acciones es la mayor respuesta obtenida, con un 38%. Por su parte, se corresponden “a menudo” con un 36%.

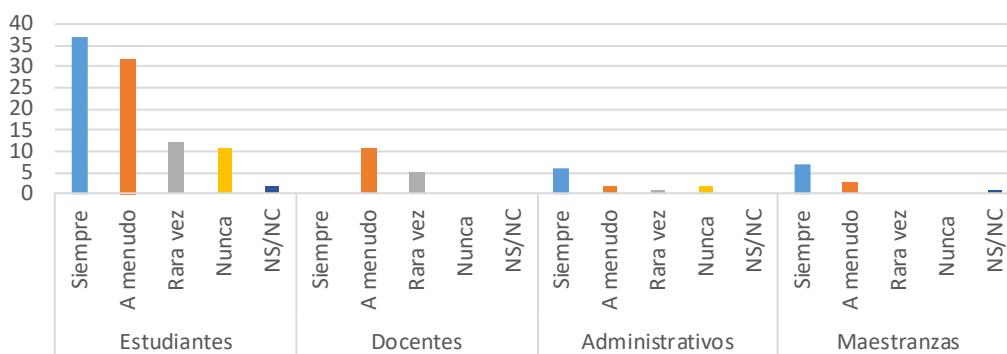


Figura 6. Reutilización y/o reciclado. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Si bien el 65% de los estudiantes desconoce si se separan los residuos en su hogar, el 69% de los docentes, 64% de administrativos y 64% de maestranzas separan los residuos en su espacio de trabajo. En particular, se pregunta al estamento estudiantes si tiene interés en que existan actividades sustentables en la escuela, así como si desea ser parte de una comunidad con conciencia ambiental, si quiere saber más sobre la temática de sustentabilidad ambiental y si habla del cuidado del medio ambiente en el hogar y con amigos. En correspondencia, se consulta al estamento docente si tiene interés en que existan actividades sustentables en la escuela, así como si desea ser parte de actividades que promuevan la sustentabilidad ambiental y si quiere capacitarse en la temática de sustentabilidad ambiental (ver Figura 7). En total se observa que hay un mayor interés en “la existencia de actividades sustentables en la escuela”, en “capacitarse sobre la temática de sustentabilidad ambiental” y en “ser parte de una comunidad con conciencia ambiental”, con un 16%, 13% y 19%, respectivamente.

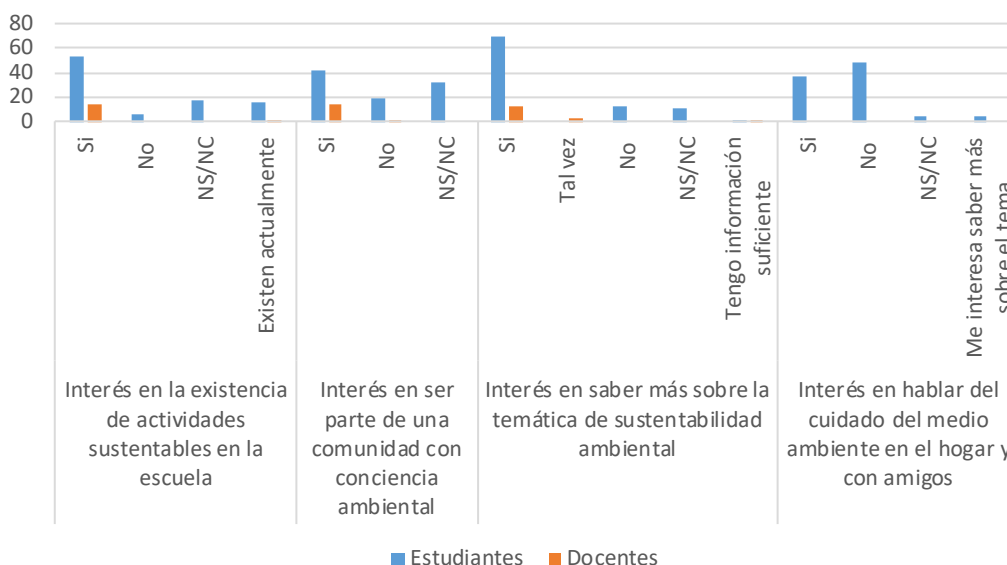


Figura 7. Sustentabilidad ambiental en el estamento estudiantes y docentes. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Diseño del Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar

De manera análoga a lo definido en Alonso Frank (2019), se propone una valoración de la frecuencia con la cual los estudiantes, docentes, administrativos y maestranzas realizan ciertas acciones. Se parte de que, si “siempre” poseen un comportamiento en pos del cuidado del medio ambiente, la energía eléctrica, el gas, el agua y el reciclado, entonces poseen un desempeño más eficiente. En este sentido, los equivalentes numéricos permiten cuantificar cada acción. La Tabla 1 muestra el equivalente numérico de 1 (muy poco eficiente) a 5 (muy eficiente), en función de su frecuencia de uso.

Tabla 1. Equivalentes numéricos de evaluación de la frecuencia. Fuente: Elaboración propia en base a Alonso Frank (2019).

Frecuencia	Significado	Equivalente numérico
Siempre	Muy eficiente	5
A menudo	Eficiente	4
Rara vez	Término medio	3
Nunca	Poco eficiente	2
NS/NC; No es tarea que me corresponda	Muy poco eficiente	1

A partir de la abstracción matemática desarrollada y aplicada en Alonso Frank (2019) se obtiene la ponderación para las acciones en pos del cuidado del ambiente, la energía eléctrica, el gas, el agua y el reciclado, acorde a la frecuencia de uso, a efectos de determinar el Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar (ISACE) (ver Ecuación 1 a 5).

$$P_{BP} = \frac{5 * \sum_{i=0}^n v5 + 4 * \sum_{i=0}^n v4 + 3 * \sum_{i=0}^n v3 + 2 * \sum_{i=0}^n v2 + 1 * \sum_{i=0}^n v1}{\sum_{i=0}^n vt} \quad (1)$$

$$P_I = \frac{5 * \sum_{i=0}^n v5 + 4 * \sum_{i=0}^n v4 + 3 * \sum_{i=0}^n v3 + 2 * \sum_{i=0}^n v2 + 1 * \sum_{i=0}^n v1}{\sum_{i=0}^n vt} \quad (2)$$

$$P_{ACE} = \frac{5 * \sum_{i=0}^n v5 + 4 * \sum_{i=0}^n v4 + 3 * \sum_{i=0}^n v3 + 2 * \sum_{i=0}^n v2 + 1 * \sum_{i=0}^n v1}{\sum_{i=0}^n vt} \quad (3)$$

$$P_R = \frac{5 * \sum_{i=0}^n v5 + 4 * \sum_{i=0}^n v4 + 3 * \sum_{i=0}^n v3 + 2 * \sum_{i=0}^n v2 + 1 * \sum_{i=0}^n v1}{\sum_{i=0}^n vt} \quad (4)$$

$$ISACE = \frac{P_{BP} + P_I + P_{ACE} + P_R}{4} \quad (5)$$

Donde:

- P_{BP} = Ponderación de las prácticas dirigidas a proteger ambiente, el agua, la energía eléctrica y el gas; del encendido.
- P_I = Ponderación del encendido y/o apagado de la iluminación al iniciar o finalizar la actividad escolar del personal.
- P_{ACE} = Ponderación de la desconexión de los aparatos eléctricos y cargadores cuando no están en uso.
- P_R = Ponderación de la reutilización y/o reciclado.
- $ISACE$ = Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar producto de la ponderación del total de acciones en pro del cuidado del ambiente, la energía eléctrica, el gas, el agua y el reciclado, en función de la frecuencia de uso.
- $ISACE$ = Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar.

- 5, 4, 3, 2, 1= Equivalentes numéricos de la frecuencia de uso de una estrategia (Tabla 1).
- v_5 = total de votos con equivalente numérico 5.
- v_4 = total de votos con equivalente numérico 4.
- v_3 = total de votos con equivalente numérico 3.
- v_2 = total de votos con equivalente numérico 2.
- v_1 = total de votos con equivalente numérico 1.
- vt = Total de votos emitidos.

De manera similar a los sistemas de etiquetado existentes en el mercado, a cada valor obtenido de ISACE se le otorga una letra, que va de la “A” (muy eficiente) a la “G” (muy poco eficiente) (Alonso Frank, 2019). La Tabla 2, describe la calificación obtenida en función de los rangos de puntuación.

Tabla 2. Calificación de las P_{BP} , P_I , P_{ACE} , P_R e ISACE, en función del intervalo de puntuación obtenido. Fuente: Elaboración en base a Alonso Frank (2019).

Calificación de las P_{BP} , P_I , P_{ACE} , P_R e ISACE	Intervalo de puntuación
A	$\geq 4,429$ a $\leq 5,000$
B	$\geq 3,857$ a $< 4,429$
C	$\geq 3,286$ a $< 3,857$
D	$\geq 2,714$ a $< 3,286$
E	$\geq 2,143$ a $< 2,714$
F	$\geq 1,571$ a $< 2,143$
G	$\geq 1,000$ a $< 1,571$

Con el objeto de informar a los estudiantes, docentes, administrativos y maestranzas su ISACE, el equivalente numérico se traduce a una etiqueta de eficiencia (Alonso Frank, 2019). La misma va de la “A” a la “G”, donde la flecha indica la valoración obtenida por los mismos (ver Figura 8a). Asimismo, se propone un sello que persigue identificar a las comunidades escolares sustentables que obtengan un promedio igual o superior al equivalente a la calificación B (ver Figura 8b).



Figura 8a. Etiqueta del ISACE. Ejemplo: ISACE = A. Fuente: Elaboración propia, 2023.



Figura 8b. Sello de comunidad escolar sustentable. Fuente: Elaboración propia, 2023.

RESULTADOS

Análisis de los resultados

De los resultados expuestos precedentemente se destaca que del total de encuestas efectuadas en los cuatro estamentos del edificio CCU, más del 70% se corresponde a estudiantes y el 65% a mujeres. En

cuanto a las edades, varían entre 12 y 17 en estudiantes, destacándose los 13 y 16 años, mientras que en el personal oscila entre los 20 y 68 años, predominando los 51-55 años, seguido de los 31-40 y 56-65 años.

En relación a la frecuencia con la que realizan prácticas dirigidas a proteger el ambiente, el agua, la energía eléctrica y el gas, se procede a la determinación de la P_{BP} . De esta manera, resulta que las prácticas se orientan principalmente al cuidado del agua, seguido de la energía eléctrica, el ambiente y el gas. Si se analiza el comportamiento por estamento, el más eficiente es el personal de maestranzas ($P_{BP}=A$), seguido de docentes ($P_{BP}=B$), administrativos ($P_{BP}=C$) y estudiantes ($P_{BP}=C$) (ver Figura 9).

En esta línea, en lo respectivo a la motivación por el ahorro del agua y la energía eléctrica, se observa que predomina el contribuir a mitigar la crisis hídrica y la contaminación derivada del consumo de energía, seguido en menor medida por el ahorro de dinero en el pago de la factura.

En lo que se refiere a si el personal enciende y/o apaga la iluminación al iniciar o finalizar su actividad, resulta que hay una tendencia al apagado más que al encendido de las mismas y que los docentes ($P_I=C$) y maestranzas tienen un comportamiento más eficiente ($P_I=C$) que los administrativos ($P_I=D$) (ver Figura 9). En este sentido, en lo concerniente a la desconexión de los aparatos eléctricos y cargadores cuando no están en uso, los cuatro estamentos tienen un desempeño eficiente producto del predominio del “siempre” y “a menudo” en sus respuestas ($P_{ACE}=A$ y B) (ver Figura 9).

En materia de reutilización y/o reciclado, se aprecia un mejor desempeño en el estamento maestranzas ($P_R=A$), seguido de administrativos ($P_R=B$), estudiantes ($P_R=B$) y docentes ($P_R=C$) (ver Figura 12).

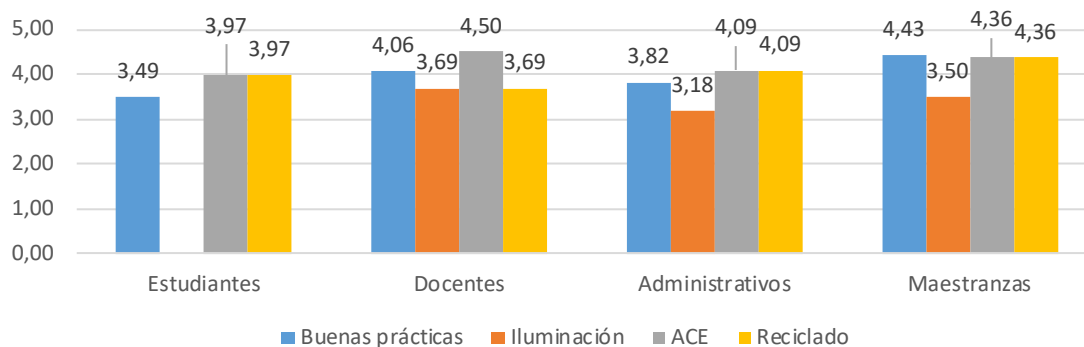


Figura 9. Ponderación de las prácticas dirigidas a proteger el ambiente, el agua, la energía eléctrica y el gas; del encendido y/o apagado de la iluminación al iniciar o finalizar la actividad escolar del personal de los docentes, administrativos y maestranzas; de la desconexión de los aparatos eléctricos y cargadores cuando no están en uso; de la reutilización y/o reciclado.

Finalmente, en cuanto al interés en que existan actividades sustentables en la escuela se observa una tendencia positiva en estudiantes (57%) y que resulta más favorable en docentes (88%). De igual manera, hay un deseo parcial por ser parte de actividades que promuevan la sustentabilidad ambiental en estudiantes (45%) y amplio en docentes (88%). En cuanto al interés en saber más sobre la temática de sustentabilidad ambiental, destacan tanto los estudiantes (73%) como los docentes (75%). Por último, los estudiantes manifiestan escaso interés en hablar del cuidado del medio ambiente en el hogar y con amigos (39%).

Análisis de resultados de la aplicación del ISACE

En función de lo expuesto en Figura 9 y lo desarrollado en Ecuación 5, el estamento de estudiantes obtiene un $ISACE=3,81$ (C), el de docentes un $ISACE=3,98$ (B), el de administrativos un $ISACE=3,80$ (C) y el de maestranzas un $ISACE=4,16$ (B). En consecuencia, el valor total del Índice de Sensibilidad Ambiental de la Comunidad Escolar del Colegio Central Universitario es de 3,94 (B). La Figura 10 expone la etiqueta alcanzada por el mismo, el cual, además, obtiene el sello de Comunidad Escolar Sustentable presentado en la Figura 8b.



Figura 10. Etiqueta del ISACE del CCU.

CONCLUSIONES

Dado que la comunidad educativa realiza acciones que inciden positiva y/o negativamente en el cuidado del ambiente, el agua, la energía eléctrica y el gas, se diseña la herramienta metodológica que se materializa en una etiqueta con escala de valores con letras que van de la “A” a la “G” y colores, del verde al rojo, respectivamente, para reflejar el nivel de sensibilidad ambiental de la comunidad escolar. De esta manera, se da continuidad a los códigos internacionales de etiquetado, contribuyendo a las estrategias de MECSA, por representar un aporte a la sustentabilidad del hábitat.

El resultado de las encuestas permite comprender que, del total de la comunidad escolar, los estudiantes y docentes tienen mayor interés en el cuidado del agua y la energía eléctrica. En este aspecto, los administrativos y personal de maestranza, presentan interés por el cuidado de los recursos naturales. En los cuatro estamentos, la principal motivación de ello es la de contribuir a mitigar la crisis hídrica local, así como a disminuir la contaminación producida por el consumo energético. Por su parte, los docentes, seguidos por los encargados del mantenimiento, se manifiestan activos en lo relativo al encendido y apagado de la iluminación de sus espacios de trabajo. En esta línea, tanto estudiantes, docentes, administrativos y maestranzas expresan estar atentos a la desconexión de los aparatos eléctricos y cargadores, así como a la reutilización y el reciclado.

Asimismo, dentro del proceso de comunicación y difusión se destaca la importancia de comprometer a los delegados de la comunidad respecto a la difusión del formulario Google. Vale destacar que el contacto con alumnos y disponer de un espacio para realizar una charla previa en relación a los objetivos del cuestionario, es una estrategia necesaria para captar la atención y aumentar el interés de la población a encuestar, en lo referido al desarrollo del diagnóstico.

Por último, se destaca que el ISACE del Colegio Central Universitario refleja a una comunidad comprometida por el cuidado del ambiente. En este sentido, replicar la presente propuesta en otros edificios escolares de la región conduciría a una mayor sensibilización del uso responsable de los recursos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de San Juan por la contribución en el financiamiento de la investigación en el marco del proyecto CICITCA 2023-2024.

REFERENCIAS

Alonso Frank, A. (2019). Herramienta integral de valoración de la eficiencia energética de edificios escolares en altura en etapa post-ocupación. El habitante como eje fundamental. Casos de estudio en ciudad de San Juan, Argentina. Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.

- Brundtland, Gro Harlem (1987). *Nuestro futuro común. Desarrollo Sostenible*. Organización de las Naciones Unidas.
- Bustos, C., Ré, M. G. y Alonso Frank, A. (2022). Proceso de diseño de una herramienta metodológica aplicada a la comunidad escolar. Encuesta en línea como apoyo para la investigación. En *Jornadas Internas de Investigación y Extensión*, Universidad Nacional de San Juan.
- Castañeda, J.A. y Luque, T. (2004). Diseños de investigación comercial en internet: oportunidades y limitaciones. *Investigación y Marketing*, 84, 20-28.
- Colegio Central Universitario Mariano Moreno, UNSJ. Dirección URL: <https://www.ccu.unsj.edu.ar/institucional/institucional/85>> [consulta: 29 de Junio de 2023]
- García Ferrando M. (1993). La encuesta. In: Garcia M., Ibáñez J., Alvira F., editors. *El análisis de la realidad social. Métodos y técnicas de Investigación*. Alianza Universidad Textos; Madrid. 141–170.
- García Rodríguez, M. E. (2006). El diagnóstico ambiental con fines pedagógicos punto de partida para la educación ambiental en la escuela. *LUZ*, 5(MA).
- Gómez Soto, J. A. (2020). Diagnóstico institucional: aproximación a las dificultades para la incorporación de la dimensión ambiental a la dinámica de la escuela. *Praxis, Educación Y Pedagogía*, (5), 28–53. https://doi.org/10.25100/praxis_educacion.v0i5.8340.
- Linares Guerra, E. M., Díaz Aguirre, S., González Pérez, M. M., Pérez Rodríguez, E., y Córdova Vázquez, V. (2021). Metodología para el diagnóstico ambiental comunitario con fines investigativos desde el posgrado académico. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(4), 309-319.
- López Roldán, P., y Fachelli, S. (2015). La encuesta. En, P. López-Roldán y S. Fachelli, *Metodología de la Investigación Social Cuantitativa*. Autónoma de Barcelona.
- Martínez, Facundo (2022). Sistema gráfico de concientización de la sustentabilidad ambiental en un edificio escolar existente de la ciudad de San Juan. Informe Final. Beca CIN: Estímulo a las Vocaciones Científicas. Directora: Mg. Arq. Ré, María Guillermina.
- Martínez Bernal, L. F., Caro-González, A. L., Duran-Dueñas, J. C., Pacheco-Salazar, N. P., & Toro-Calderón, J. J. (2017). Propuesta metodológica para la identificación y evaluación de aspectos ambientales en instituciones de educación superior. *Gestión y Ambiente*, 20(2), 199-209
- Merino Remón, L., Espino Suárez, M., & Castro García, D. (2018). Diagnóstico ambiental de la Escuela Latinoamérica de Medicina. *Panorama Cuba y Salud*, 13(Especial), 265-269.
- Pachay Loor, Lupe del Rocio, Navarrete Pita, Yulexy, Grismaldo Pico Mieles, José (2021). Desarrollo de la educación ambiental en estudiantes de quinto grado de la Escuela de Educación Básica “Eloy Alfaro” *Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, V. 9, N. 2, pp. 73-90.
- Re, M. G. y Alonso Frank, A. (2023). Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental para escuelas. Aplicación en casos de estudio del Área Metropolitana de San Juan. Proyecto CICITCA, Universidad Nacional de San Juan.
- Ré, M. G. y Bianchi, M. F. (2020) Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética en edificios escolares existentes. *Revista Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 45, pp. 39 – 49.

DIAGNOSIS OF THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL AWARENESS OF A SCHOOL COMMUNITY.

ABSTRACT: Population growth and economic and industrial progress achieved during the last century have been accompanied by environmental degradation that endangers the availability of finite resources and the conditions necessary for human survival. In this framework, school establishments play an essential role due to their ability to raise awareness among both students and teaching, administrative and maintenance staff about the importance of caring for the environment. In this line, the objective of this work is to carry out an analysis and qualification of the behavior of the four classes that make up the population of a school building in the Metropolitan Area of San Juan, Argentina. For its scope, the Environmental Sensitivity Index of the School Community is designed and it is evaluated in relation to environmental awareness, the use of electrical energy, gas, water and recycling actions. From the results obtained, it is highlighted that the case study presents an environmentally sustainable performance. It is concluded that the proposed rating tool represents a contribution in terms of raising awareness of the care of resources and the possibility of being replicated to other educational communities is highlighted.

Palabras clave: school, index, environmental sustainability, awareness.

DISEÑO Y SIMULACIÓN TÉRMICA DE UN INVERNADERO ANDINO ESCOLAR EN ESTACIÓN SALAR DE POCITOS, PROVINCIA DE SALTA

Sofía Avalos Ambroggio¹, Sebastián Miguel¹

¹Instituto de Sustentabilidad Energética y Diseño Bioambiental. Universidad Católica de Salta.

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Salta, Argentina.

e-mail: sofia.avalos@unc.edu.ar, samiguel@ucasal.edu.ar

RESUMEN: Se plantea el diseño y simulación del comportamiento térmico de un invernadero andino para producción de alimentos ubicado en la Escuela Pública “7 de Mayo” en Estación Salar de Pocitos, Provincia de Salta, Argentina. El objetivo propuesto es evaluar el desempeño del invernadero diseñado durante las 4 estaciones del año utilizando SIMEDIF 2.0 para simular las temperaturas interiores. Se incluyen mejoras en el diseño: aberturas y rejillas de ventilación con posibilidad de cierre, y muros acumuladores tipo trombe en la fachada norte, evaluando aportes de calor de dos alternativas: muro con cámara de aire y vidrio simple y muro con cámara de aire y DVH. Los resultados que se obtienen son contrastados con las temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para cultivos. Se puede evidenciar un comportamiento favorable durante los meses de otoño y primavera. En los meses de invierno, ante condiciones extremas bajo cero, la temperatura interior logra mantenerse por sobre la *temperatura letal* para cultivos. En los meses de verano se requiere ventilación natural para reducir las máximas temperaturas alcanzadas y lograr así las temperaturas recomendadas.

Palabras clave: invernadero, tecnología, simulación, transferencia.

INTRODUCCIÓN

En la región de la Puna Argentina, las condiciones adversas del clima (bajas temperaturas, gran amplitud térmica diaria y estacional, y presencia de fuertes vientos) como así también las características particulares de los suelos, hacen que la producción de cultivos sea posible solo bajo recintos cerrados. Esto ha llevado a proponer técnicas constructivas de invernaderos adaptados a los territorios de la región fría y al paisaje del altiplano. Asimismo, las condiciones de radiación solar son muy favorables para su aprovechamiento en el desarrollo de cultivos bajo techo.

Se han llevado a cabo numerosas experiencias de diseño, construcción y evaluación del desempeño de invernaderos en la región (Quiroga et. al. 1998; Quiroga et. al. 1999; Echazú et al., 2004; Quiroga et al., 2005 entre otros), identificando dificultades para mantener la temperatura nocturna en niveles adecuados para los cultivos debido a infiltraciones excesivas, aislaciones térmicas insuficientes y poca acumulación de calor. A su vez, se presentan problemas de exceso de temperatura interior causado por la escasa ventilación y baja remoción de la humedad.

En busca de continuar optimizando el funcionamiento de los invernaderos andinos en todos los aspectos mencionados, se diseñó un prototipo para la Escuela Pública “7 de Mayo” de Estación Salar de Pocitos, departamento Los Andes, Salta. El mismo tendrá una función educativa, en la transferencia de prácticas habituales sobre cultivos bajo invernaderos. Al mismo tiempo, producirá alimentos para consumo en el comedor de la escuela. El diseño fue llevado a cabo por investigadores y proyectistas del ISEDIB (Instituto de Sustentabilidad Energética y Diseño Bioambiental-UCASAL) mediante un convenio de financiamiento con la Fundación Condor, a través de talleres participativos con habitantes del lugar, considerando experiencias previas.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento del invernadero proyectado en las 4 estaciones del año mediante simulación térmica, comparando la temperatura interior alcanzada con las temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para cultivos por el INTA (Lencsak e Iglesias, 2019).

Además, se propone realizar la evaluación de la inclusión de mejoras, incorporando muros acumuladores del calor (muros trombe) en la fachada norte, tanto con vidrio simple, como con DHV, para determinar si los muros acumuladores pueden colaborar en aumentar la temperatura interior.

ANTECEDENTES

Desde la década de 1980 los invernaderos se constituyen en un elemento importante para cultivar hortalizas para autoconsumo a lo largo del territorio del altiplano. Se han construido innumerables modelos y diseños de invernaderos, reproducidos por generaciones con saberes adquiridos y técnicas constructivas propias de la región. Organismos como el INTA y diferentes ONG's como OCLAVE han promovido la construcción de pequeños invernaderos para uso familiar, diseñados para resistir fuertes vientos y bajas temperaturas, que permiten el extender el cultivo de verduras y hortalizas durante todo el año.

El modelo que se introdujo inicialmente fue el de cubierta abovedada, también conocido como “modelo andino” o “de altura”, que consta de un recinto semienterrado con muros de abobe y cubierta parabólica de polietileno. Este modelo es el más difundido, de construcción muy sencilla y costo moderado, pero muy limitado en cuanto a la regulación térmica (Echazú et al., 2004). Se han construido también invernaderos del tipo boliviano, llamados *Walipinis* y *Panqar Huyu* (Iturry, 2002) de mejor funcionamiento térmico debido a su emplazamiento semienterrado (Quiroga et al. 1999).

El éxito de las experiencias de pequeños invernaderos familiares derivó en la construcción de invernaderos en escuelas albergues, para cultivo de hortalizas para consumo del comedor y para prácticas agrícolas de los alumnos (Combetto, Benedetti, y Pelicano, 2000). En particular, el INENCO (Instituto de Investigación de Energía No Convencional, UNSa-CONICET) diseñó y estudió modelos de invernaderos basados en el diseño andino incluyendo mejoras en las técnicas constructivas tradicionales: materiales, forma del techo, aislaciones, ventilaciones y sistema de acumulación térmica (Belmonte et al., 2016).

Se puede mencionar el prototipo de invernadero instalado en el año 1998 con diseño andino mejorado en la localidad de Nazareno, Salta, que incorporó muros de piedra para aumentar la acumulación térmica, y el uso de una *cámara oscura* próxima a la zona de cultivos como lugar de preparación del compost orgánico para abono de la huerta (Quiroga et al., 1998). También el invernadero en Abra Pampa – Jujuy (1999), realizado mediante una experiencia conjunta entre INENCO y OCLADE, destinado al cultivo de flores en pequeña escala, en donde se introdujeron mejoras reduciendo la superficie de sombreado a la mitad, agregando ventanillas de ventilación y colocando doble techo para reducir pérdidas en invierno (Quiroga y Echazú, 1999; 2016). El prototipo instalado en 2003-2004 para la producción de hortalizas para el comedor de la Escuela albergue N° 4526 de El Rosal (Echazú et al., 2004; Quiroga et al., 2005) incorpora además 8 registros con un sistema de llaves de dos vías de control manual para regular la circulación de aire entre el invernadero y el exterior, y el invernadero y la cámara oscura. El mismo ha funcionado durante años con cultivos principalmente hortícolas (Quiroga et al., 2016). Finalmente, el invernadero de El Alisal, en el que la cámara oscura fue reemplazada por un recinto destinado a salón comunitario de actividades múltiples (Quiroga y Echazú, 2016).

Otras experiencias monitoreadas en zonas altoandinas de Perú señalaron la necesidad de incorporar en la cubierta elementos traslúcidos de máxima transparencia a la radiación solar de onda corta que llega durante el día (Zanabria, 2015). A su vez, estos elementos deben tener una opacidad considerable al paso de la radiación infrarroja de onda larga emitida por el suelo, plantas y muros, para que el calor acumulado no se pierda hacia el exterior durante la noche (Álvarez Díaz et al., 2022).

Las experiencias citadas anteriormente en la Puna Argentina demuestran que muchas veces, el paso de la radiación solar de onda corta a través de la cubierta transparente provoca un aumento excesivo de la temperatura dentro del invernadero (Abdo et al, 2005).

La falta de ventilación durante las horas de mayor radiación solar provoca altas temperaturas en el interior de los invernaderos, lo que conlleva a un daño y marchitamiento de los cultivos (Echazú et al., 2004). Además, la escasa ventilación relacionada con la baja remoción de la humedad ambiente del recinto provoca graves problemas sanitarios en las plantas, por proliferación de hongos y una

contaminación progresiva del suelo. Esto lleva a una disminución en la producción de cultivos (Echazú et al., 2004).

TEMPERATURA RECOMENDADA

La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica y el crecimiento y desarrollo de las plantas. “En invernaderos no automatizados es difícil lograr mantener los valores de temperatura dentro de los rangos óptimos para cada cultivo, por lo cual los procesos de crecimiento pueden ralentizarse y comprometer los niveles y calidad de la producción” (Lenschak e Iglesias, 2019, pág. 17). Los valores de temperaturas óptimas interiores (tanto diurnas como nocturnas) requeridos para la producción vegetal propuestos por el INTA (Lenschak e Iglesias, 2019) se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para diferentes cultivos.

Especie	Temperatura óptima nocturna (°C)	Temperatura óptima diurna (°C)	Temperatura mínima letal (°C)
Tomate	13 °C – 16°C	22°C – 26°C	0 °C – 2°C
Calabaza	15 °C – 18°C	24°C – 30°C	0 °C – 4°C
Chauca	16 °C – 18°C	21°C – 28°C	0 °C – 2°C
Pimiento	16 °C – 18°C	22°C – 28°C	0 °C – 4°C
Lechuga	10 °C – 15°C	15°C – 20°C	0 °C – 2°C

Además, Martínez y Roca (2011) incluyen *la temperatura mínima letal* para cultivos. Esta se refiere al “umbral por debajo del cual la planta puede sufrir daños irreversibles” (Martínez y Roca, 2001, pág. 184). Los valores presentados serán tenidos en cuenta en la evaluación del desempeño térmico del prototipo de invernadero propuesto en el presente trabajo.

DISEÑO DEL INVERNADERO

El diseño está basado en los modelos de invernaderos existentes en la región andina. Consta de dos espacios interiores: el área de cultivo, orientada al norte, con una superficie total de 55.00 m², y una cámara de convección, llamada cámara oscura en los estudios citados anteriormente, orientada al sur, de 11.00 m².

El área de cultivo esta semienterrada en dos niveles de terraza, uno a un nivel de -0.18m y otro a -0.36m de profundidad. Los muros exteriores son de adobe, de 40 cm de espesor, apoyados sobre un basamento de piedra. Sobre el muro exterior norte se ubican muros acumuladores de calor (muros trombe) estancos para captar energía calórica y luego entregarla al ambiente en horas de la tarde/noche por efecto de radiación. (Fig.1)

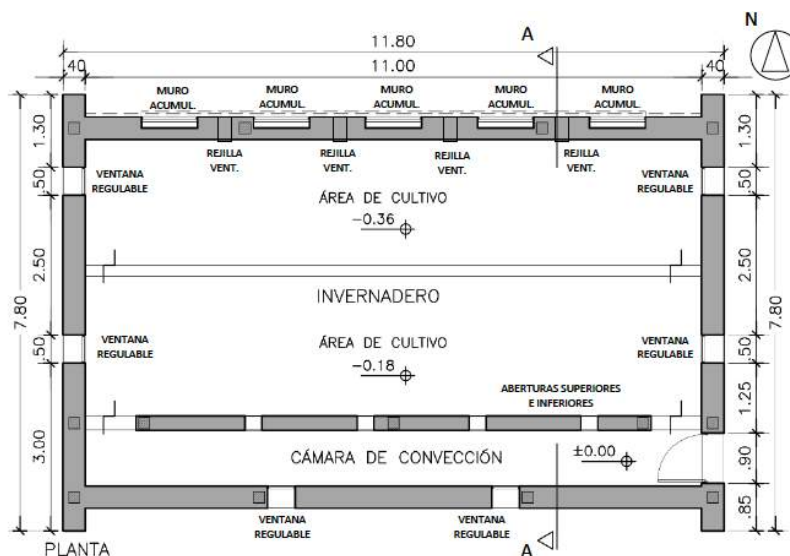


Figura 1. Planta del Invernadero proyectado

La cámara de convección contribuye a atenuar la amplitud térmica. Por un lado, se utiliza para proteger el área de cultivos en la orientación más fría (sur). Por otro lado, para generar movimientos convectivos de aire en el interior, contribuyendo a atenuar la amplitud térmica. Esto se realiza por medio de perforaciones altas y bajas que se practican en el muro divisorio interno, también realizado de adobe, con un espesor de 20 cm. (Fig.2)

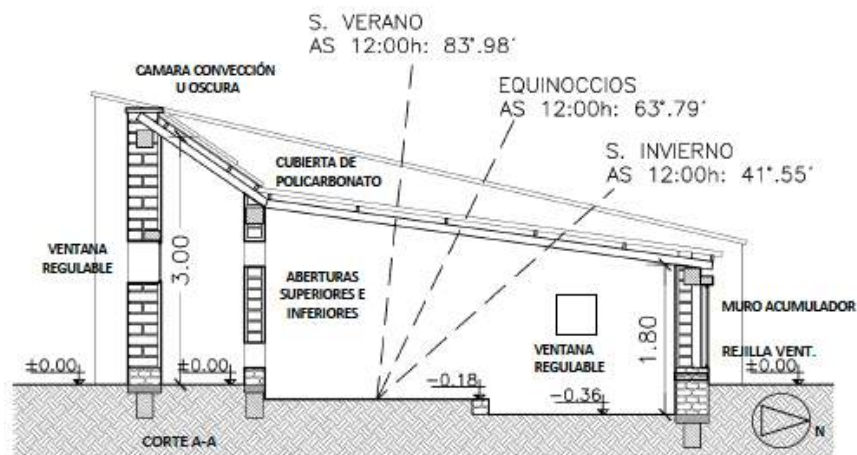


Figura 2. Corte A-A del Invernadero proyectado.

En las fachadas este, oeste y sur se ubican pequeñas aberturas de aluminio con vidrio simple, para ventilar el ambiente del invernadero cuando las temperaturas sobrepasen las máximas recomendadas, ya sea en épocas estivales o durante las horas de la tarde. Asimismo, se incorporan una serie de rejillas de ventilación móvil con posibilidad de cierre en la parte baja del muro norte para mejorar la ventilación y regular el exceso de calor que pudiera tener el interior del invernadero en los meses de verano.

La cubierta es una estructura metálica de perfiles y caños de hierro. En la zona del invernadero tiene una chapa de policarbonato transparente, mientras que sobre la cámara de convección se coloca una chapa acanalada opaca, con aislación donde también se dispone un sistema de producción de energía eléctrica para el consumo de la escuela a través de energía solar fotovoltaica. (Fig.3 y 4)

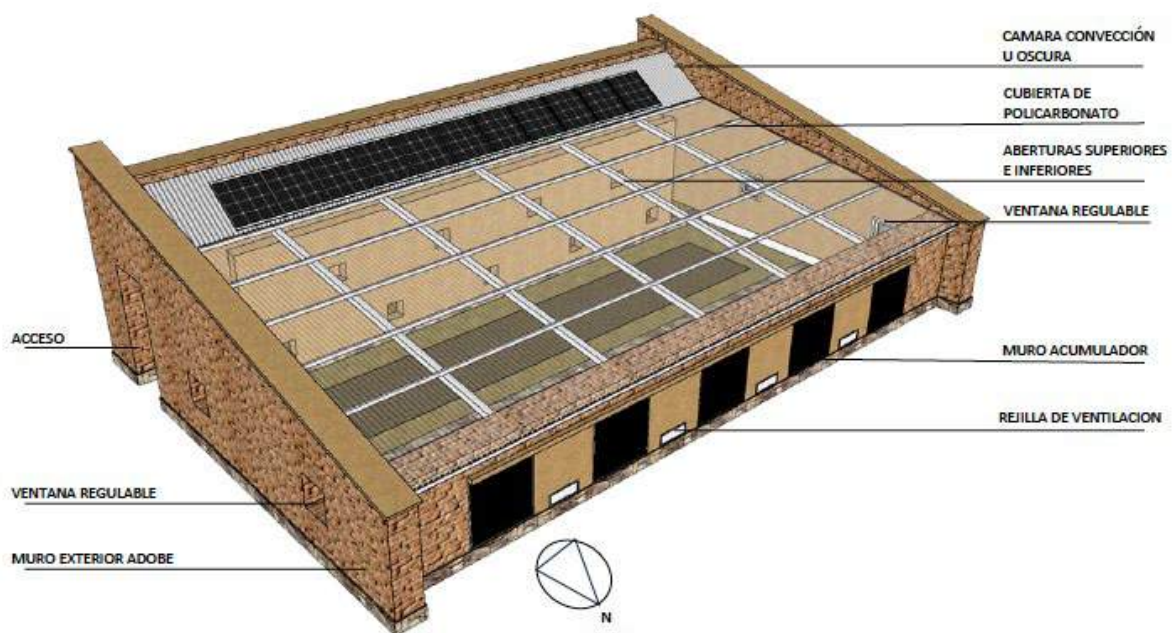


Figura 3. Axonometría del Invernadero proyectado.

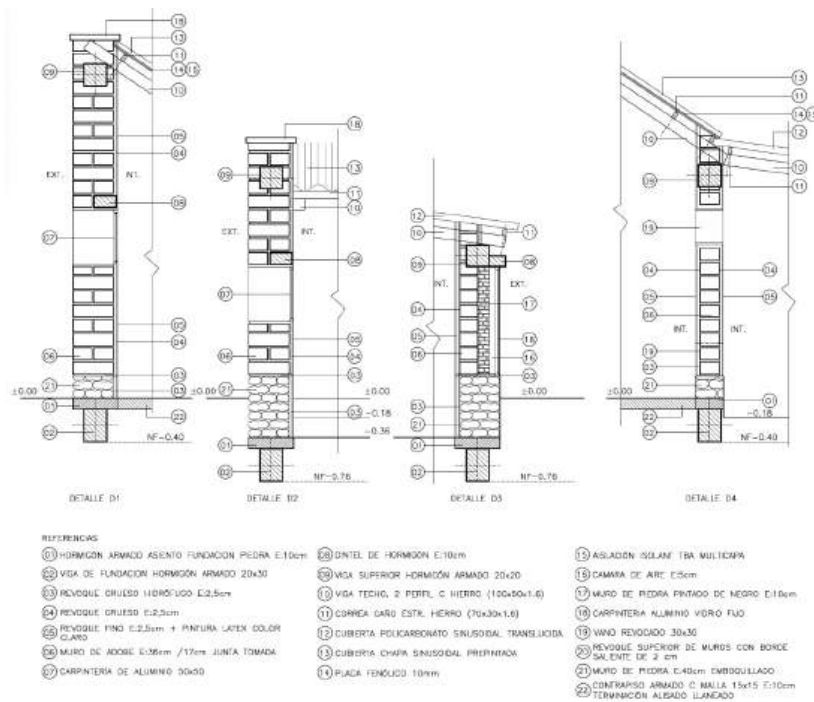


Figura 4. Detalles constructivos del Invernadero proyectado.

METODOLOGÍA

El comportamiento térmico del invernadero fue simulado utilizando el software SIMEDIF 2.0 para Windows (Flores Larsen, 2019; 2020). Este software se utiliza para realizar las simulaciones térmicas de edificios con acondicionamiento natural a través de sistemas solares pasivos. Para realizar las simulaciones se utilizó un archivo climático TMY extraído del software Meteororm 8, de extensión epw.

Se establecieron 3 zonas térmicas interiores: 1) invernadero (área de cultivo), 2) cámara de convección y 3) cámara de aire del muro acumulador, entre el revestimiento de piedra y la carpintería de vidrio fijo. Las características de las envolventes opacas se describen en la Tabla 2, y las características de envolventes transparentes se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Descripción de parámetros de envolventes opacas

Envolventes opacas	Tipo	Orientación	Sup. (m ²)	Lado Int.		Lado Ext.		Sup. Asoleada	
				Abs.	C.C.	Abs.	C.C.	Exterior	Interior
Invernadero									
M1 (Exterior)	Masiva	V- Norte 180°	14.80	0.3	6	0.3	12	14.80	0.00
M8 (M. Acum.)	Masiva	V- Norte 180°	5.00	0.3	8	0.9	6	5.00	0.00
M3 (Exterior)	Masiva	V- Este 90°	12.36	0.3	8	0.3	12	12.36	8.70 (***)
M2 (Exterior)	Masiva	V- Oeste 270°	12.36	0.3	8	0.3	12	12.36	8.70 (***)
M4 (C. conv.)	Masiva	V- Interior	21.33	0.3	8	0.3	6	15.00 (*)	0.00
M9 (Piso)	Masiva	H- Interior	56.10	0.3	8	0.3	0.01	0.00	33.00 (**)
Cámara de convección									
M5 (Exterior)	Masiva	V- Oeste 270°	3.09	0.3	6	0.3	12	3.09	0.00
M6 (Exterior)	Masiva	V- Este 90°	1.29	0.3	6	0.3	12	1.29	0.00
N3 (Puerta)	Tabique	V- Este 90°	1.80	0.5	6	0.5	12	1.8	0.00
M7 (Exterior)	Masiva	V- Sur 0°	34.73	0.3	6	0.3	12	34.73	0.00
M10 (Piso)	Masiva	H- Interior	34.00	0.3	6	0.3	0.01	0.00	0.00
N2 (Techo)	Tabique	34°-	12.10	0.2	6	0.2	12	12.10	0.00

C.C.: Coeficiente convectivo radiativo / Abs: Absortancia solar
 (*) Se considera que un 70% de la superficie del muro recibe sol a través del policarbonato de techo.
 (**) Se considera que un 60% de la superficie de piso recibe sol a través del policarbonato de techo.
 (***) Se considera que un 70% de la superficie de muro recibe sol a través del policarbonato de techo.

Tabla 3. Descripción de parámetros de envoltentes transparentes.

Envoltentes transparentes	Nº vidrios	Orient.	Sup. (m ²)	Coef. U	Material	Sup. recibe radiación
				(Wm ² K)		
V1 (Invernadero)	1	V- Este 90°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V2 (Invernadero)	1	V- Este 90°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V3 (Invernadero)	1	V- Oeste 270°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V4 (Invernadero)	1	V- Oeste 270°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V5 (C. convección)	1	V- Sur 0°	0.25	5.82	Vidrio común	M4-Lad2 Muro
V6 (C. convección)	1	V- Sur 0°	0.25	5.82	Vidrio común	M4-Lad2 Muro
V7 (M.)	1	V- Norte 90°	5.00	5.82	Vidrio común	M8-Lad2 Muro
V8 (Techo)	1	4°-Techo 180°	30.00	3.60	Policarbonato	M9-Lad1 Piso
V9 (Techo)	1	4°-Techo 180°	10.00	3.60	Policarbonato	M4-Lad1 Muro
V10 (Techo)	1	4°-Techo 180°	8.70	3.60	Policarbonato	M2-Lad1 Muro
V11 (Techo)	1	4°-Techo 180°	8.70	3.60	Policarbonato	M3-Lad1 Muro

La variable de interés es la temperatura (°C), por lo que se simularon datos de temperaturas máximas, mínimas, medias, y máximas medias y mínimas medias tanto exteriores como interiores. Se realizaron simulaciones mensuales durante las 4 estaciones del año, en abril, junio, septiembre y diciembre. En el presente artículo se presentan los 4 días considerados representativos de cada mes. Se incluye también un estudio del comportamiento del invernadero durante los 4 días más fríos del año (mes de junio). Además, se simuló durante el mes de diciembre, la incorporación de ventilación al interior del invernadero. Se adoptó como supuesto una ventilación de 15r/h durante la mañana y las primeras horas de la tarde, entre las 8:00h y las 16:00 h.

Una vez realizadas las simulaciones, se comparan resultados con las temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para cultivos presentada en la Tabla 1. En los gráficos de resultados, este rango está marcado con dos franjas de color gris: temperatura diurna recomendada: de 20°C a 30°C (gris claro) y temperatura nocturna recomendada: 15°C a 20° (gris oscuro).

Por último, se evaluó el desempeño de los muros acumuladores en fachada norte. Se realizaron simulaciones durante los meses de referencia, evaluando tres alternativas: la primera con muro acumulador usando una cámara de aire con DVH, la segunda con muro acumulador usando una cámara de aire con vidrio simple y la tercera sin muro acumulador.

RESULTADOS

Mes de abril

La Fig. 5 y Tabla 4 presentan resultados de temperatura de 4 días representativos del mes de abril.

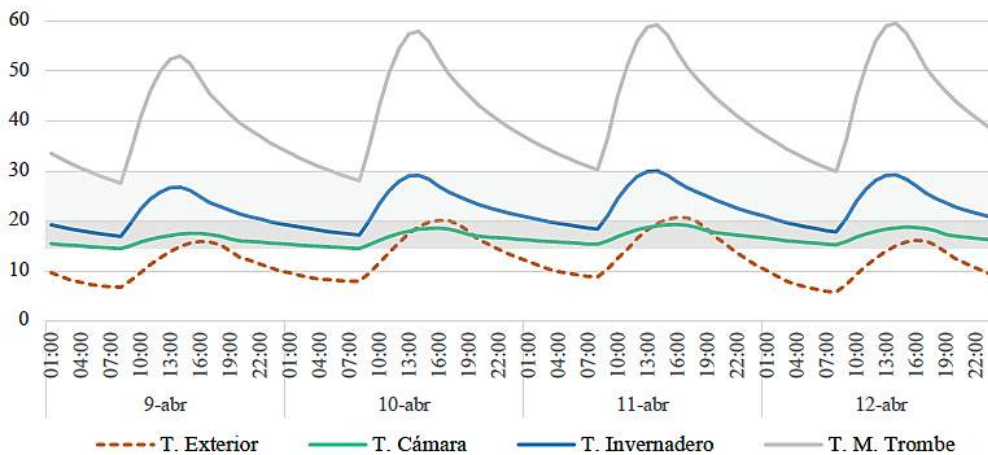


Figura 5. Gráfico de temperaturas del 9 al 12 de abril.

Tabla 4. Temperaturas simuladas para el mes de abril

Abril	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Exterior	20.7	-2.6	8.6	13.7	4.1
Invernadero	29.9	11.07	19.7	25.5	15.1
Cámara Convección	19.25	9.43	14.2	15.9	12.6
ΔT T.Inv - T.Exterior	9.2	13.7	11.1	11.8	11.0

Se puede ver que las temperaturas exteriores se encuentran por debajo de las temperaturas recomendadas, tanto durante el día como durante la noche. La máxima media del mes es 13.7°C y la mínima media 4.1°C. La temperatura interior en el invernadero (línea azul de la Fig. 1) se mantiene en el rango de temperaturas recomendadas durante el día y también durante la noche. La máxima media del mes es 25.5°C y la mínima media 15.1°C.

La diferencia promedio de temperaturas entre el exterior y el interior del invernadero es de 11°C aproximadamente, la cual se incrementa durante la noche, cuando las temperaturas exteriores son mínimas (alcanzan los 13°C de diferencia entre el exterior y el interior).

Mes de junio

La fig. 6 y Tabla 5 presentan resultados de temperatura de junio. En la Tabla 5 las temperaturas exteriores se encuentran muy debajo de las temperaturas recomendadas. Durante las horas más frías de la noche, llegan a 0°C, es decir, 15°C por debajo de lo recomendado. La máxima media del mes es 11.9°C y la mínima media -1.1°C. La temperatura mínima registrada alcanza los -8°C.

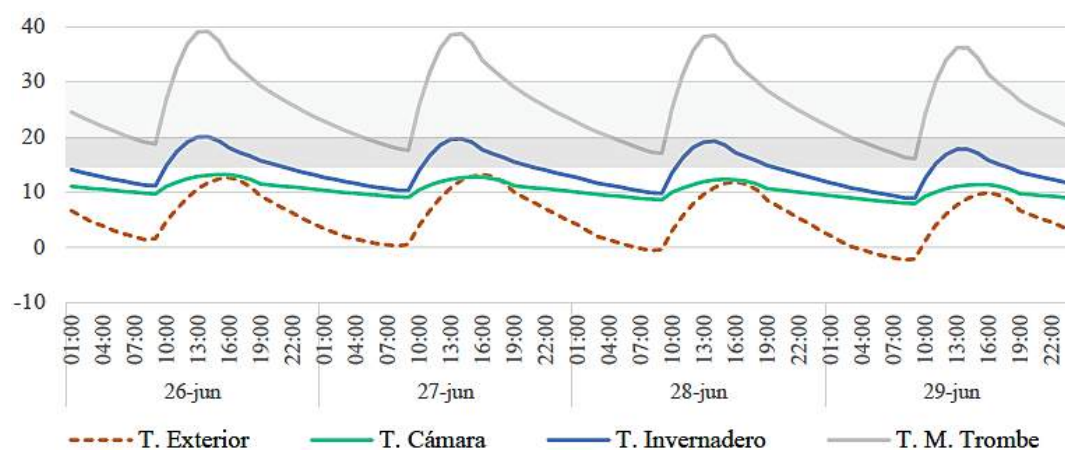


Figura 6. Gráfico de temperaturas del 26 al 29 de junio.

Tabla 5. Temperaturas simuladas para el mes de junio

Junio	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Exterior	20.5	-8	4.9	11.9	-1.1
Invernadero	21.6	3.4	12.2	17.6	8.06
Cámara Convección	13.8	2.6	8.3	10.4	6.6
ΔT T.Inv - T.Exterior	1.1	11.4	7.3	5.7	9.2

La temperatura interior en el invernadero alcanza la temperatura nocturna recomendada durante las horas del día, en el horario entre las 10:00 h y las 20:00 h. Durante la noche, las temperaturas caen por debajo de lo sugerido. La máxima media del mes es 17.9°C y la mínima media 8.06°C. La diferencia promedio de temperaturas entre el exterior y el interior del invernadero es de 5.7°C (en las temperaturas máximas) y 9.2°C (temperaturas mínimas). La diferencia de temperaturas se incrementa durante la noche, cuando las temperaturas exteriores son mínimas.

En la Fig.7, se representan los 4 días más fríos del año. La temperatura exterior alcanza valores bajo cero todas las noches, llegando a los -8°C . Se pueden ver que las bajas temperaturas son extremas, con heladas durante la noche.

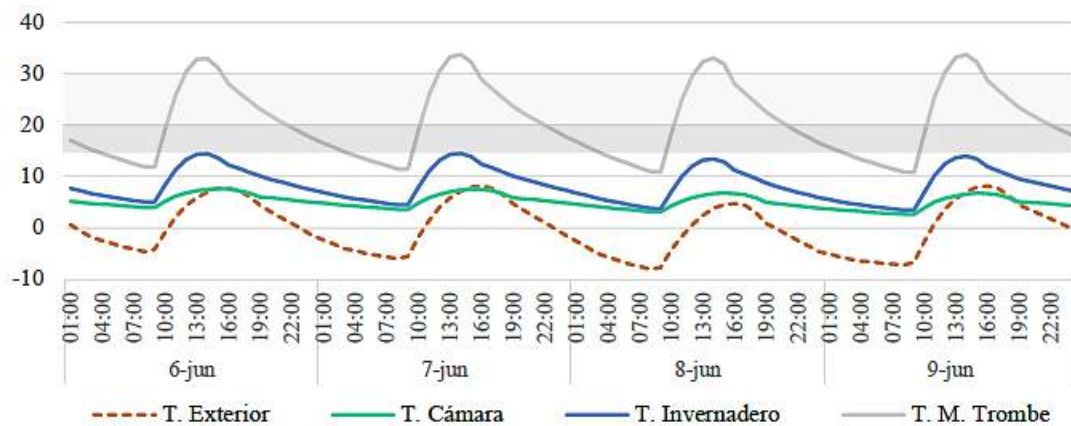


Figura 7. Gráfico de temperaturas más frías del año: 6 al 9 de junio.

Mes de septiembre

La Fig. 8 y Tabla 6 presentan resultados de curvas de temperatura de 4 días representativos del mes de septiembre.

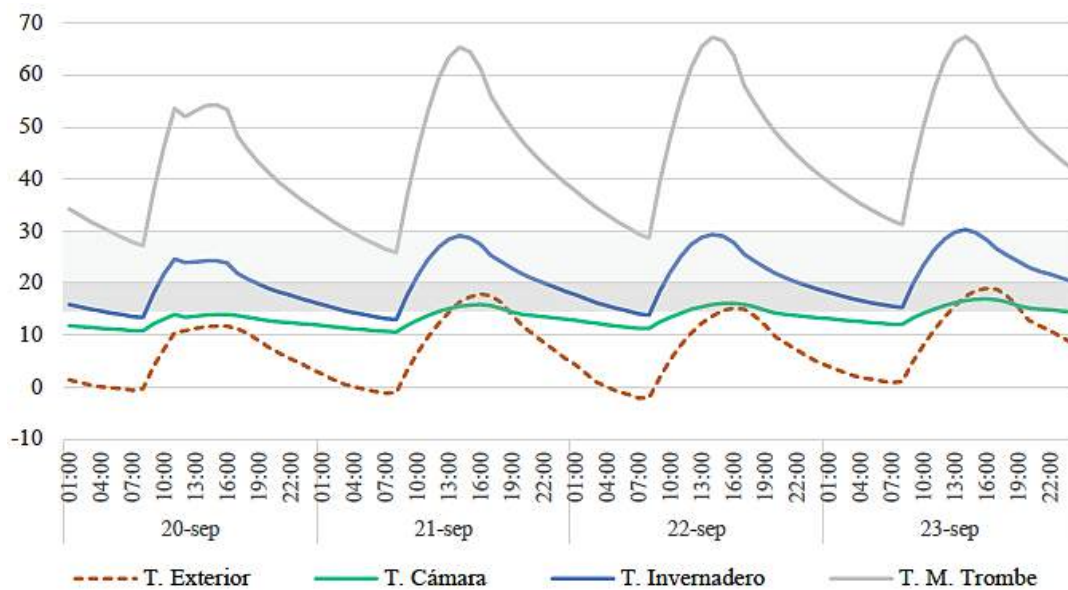


Figura 8. Gráfico de temperaturas del 20 al 23 de septiembre.

Tabla 6. Temperaturas simuladas para el mes de septiembre

Septiembre	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Exterior	25.5	-8.1	7.89	15.7	0.6
Invernadero	32.8	9.9	20.8	27.8	14.9
Cámara Convección	21.6	8.08	14.5	16.6	12.5
ΔT T.Inv - T.Exterior	7.3	18.0	12.9	12.1	14.3

Las temperaturas exteriores siguen por debajo de las temperaturas recomendadas, excepto algunos días en que la máxima diaria alcanza la mínima recomendada (21 y 23 de septiembre). La máxima media del mes es 15.7°C y la mínima media 0.6°C. La temperatura mínima registrada alcanza los -8.1°C. La temperatura interior en el invernadero alcanza la temperatura objetivo durante el día y la mayor parte de la noche. Entre las 2:00 h y las 7:00 h, las temperaturas son ligeramente menores que el mínimo recomendado (12°C). La máxima media del mes es 27.8°C y la mínima media 14.9°C.

La diferencia promedio de temperaturas entre el exterior y el interior del invernadero es de 12.1°C (máximas) y 14.3°C (mínimas). La diferencia se incrementa durante la noche, cuando las temperaturas exteriores son mínimas.

Mes de diciembre

La fig. 9 y tabla 7 presentan resultados de curvas de temperatura de los 4 días representativos del mes de diciembre. Las temperaturas exteriores alcanzan los valores recomendados durante el día, excepto algunas excepciones de días fríos (24 de diciembre). La máxima media del mes es 17.8°C y la mínima media 5.9°C. La mínima registrada alcanza los 0.4°C y la máxima 25°C.

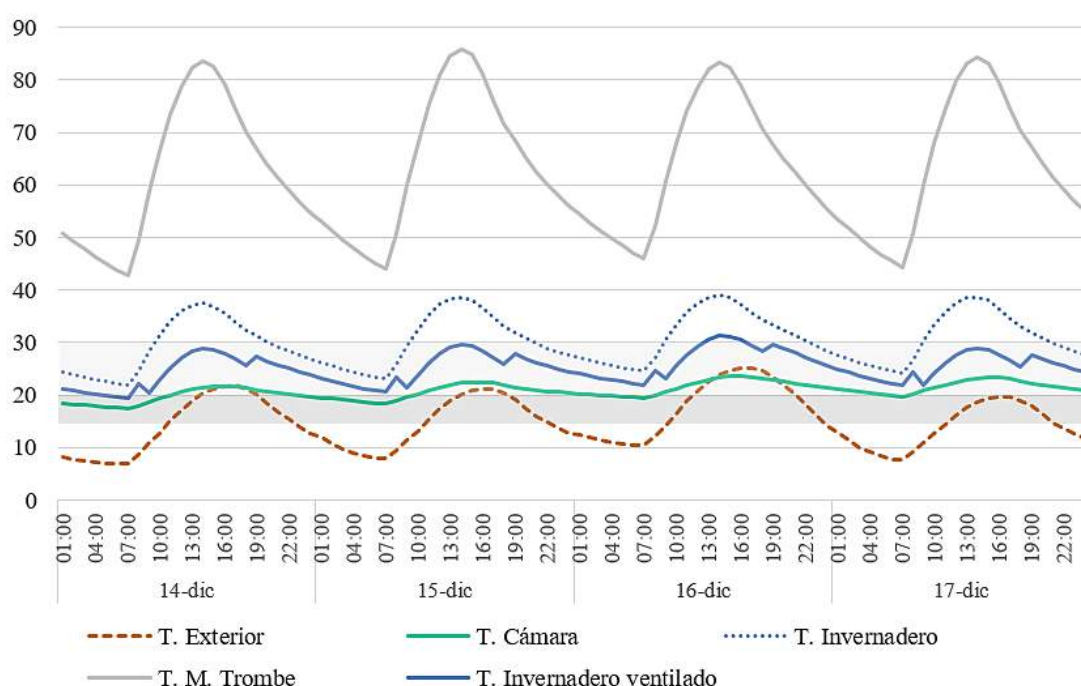


Figura 9. Gráfico de temperaturas del 14 al 17 de diciembre.

Tabla 7. Temperaturas simuladas para el mes de diciembre

Diciembre	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Mín Med.
Exterior	25.1	0.4	11.9	17.8	5.9
Invernadero	39.3	17.3	27.8	35.0	21.5
Invernadero ventilado	31.2	14.7	22.5	26.2	18.6
Cámara Convección	23.8	14.4	19.3	21.0	17.6
ΔT T.Inv - T. Inv ventilado	8.1	2.6	5.3	8.8	2.9
ΔT T.Inv - T.Exterior	6.1	14.3	10.6	8.4	12.7

La temperatura interior en el invernadero sobrepasa valores recomendados durante todo el día (desde las 9:00 h hasta las 20:00h). Durante la noche, entre las 23:00 h y las 9:00 h, las temperaturas entran dentro del rango diurno recomendado (no así en el rango nocturno). La máxima media del mes demuestra un exceso de temperatura (35°C). La máxima registrada alcanza los 39.3°C.

Es necesario incorporar ventilación de ambiente, abriendo las aberturas propuestas para tal fin, con el objetivo de bajar las temperaturas tanto diurnas como nocturnas. Los resultados de temperatura interior del invernadero ventilado entran dentro del rango recomendado, tanto diurna como nocturna. La ventilación reduce 8.8°C en las máximas medias del recinto y 2.9°C en las mínimas medias. La máxima alcanzada muestra una disminución de 39°C a 31°C.

Aporte de calor del muro acumulador

La tabla 8 muestra los resultados de desempeño de los muros acumuladores en fachada norte. En primer lugar, se puede observar que durante los cuatro períodos analizados se produce un incremento de temperatura en la zona térmica invernadero producto del aporte del muro acumulador (tanto con vidrio simple como con DVH).

Analizando resultados de las temperaturas medias, se puede observar que en abril el aporte de calor del muro acumulador con vidrio simple (MA-VS) es de 1.3°C, mientras que aporte del muro acumulador con DVH (MA-DVH) es algo mayor: 2.1°C. Esto se debe a la capacidad del DVH para controlar pérdidas.

En junio la diferencia de temperatura se reduce en ambos casos: a 0.9°C en el caso MA-VS, y 1.8 °C en MA-DVH. Sin embargo, el aporte de calor del caso MA-DVH duplica el aporte de MA-VS.

En septiembre la diferencia se incrementa a 1.4°C en MA-VS y 2°C para MA-DVH, y en diciembre (el mes que registra mayor aporte) la diferencia de temperatura es aproximadamente de 2°C y 2.3°C respectivamente, es decir, el aporte de MA-DVH es levemente mayor.

Tabla 8. Temperaturas simuladas de casos con muro acumulador

Temperaturas mes de abril					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	30.64	11.5	20.5	26.0	16.0
Muro Acum. c/VS (MA VS)	29.9	11.07	19.7	25.5	15.1
Sin Muro Acum. (SMA)	28.5	9.9	18.4	24	13.9
ΔT entre MA VS - SMA	1.4	1.17	1.3	1.5	1.2
ΔT entre MA DVH - SMA	2.1	1.6	2.1	2	2.1
Temperaturas mes de junio					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	22.4	4.4	13.1	18.4	8.9
Muro Acum. c/VS (MA VS)	21.6	3.4	12.2	17.6	8.06
Sin Muro Acum. (SMA)	20.5	2.6	11.3	16.6	7.2
ΔT entre MA VS - SMA	1.1	0.8	0.9	1.0	0.9
ΔT entre MA DVH - SMA	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7
Temperaturas mes de septiembre					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	33.59	10.6	21.5	28.2	15.7
Muro Acum. c/VS (MA VS)	32.8	9.9	20.8	27.8	14.9
Sin Muro Acum. (SMA)	31.3	8.6	19.2	26.5	13.5
ΔT entre MA VS - SMA	1.5	1.3	1.6	1.3	1.4
ΔT entre MA DVH - SMA	2.3	2.0	2.3	1.7	2.2
Temperaturas mes de diciembre					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	39.1	17.4	28.1	34.8	22.1
Muro Acum. c/VS (MA VS)	39.3	17.3	27.8	35.0	21.5
Sin Muro Acum. (SMA)	36.9	15.6	25.8	32.9	19.6
ΔT entre MA VS - SMA	2.4	1.7	2	2.1	1.9
ΔT entre MA DVH - SMA	2.2	1.8	2.3	1.9	2.5

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran una vez más que la tecnología de muros de adobe con espesor considerable es recomendable para mantener las condiciones de temperatura deseadas, debido a su masa térmica y su capacidad de acumular calor durante el día para irradiarlo a la noche. Las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior estuvieron cercanas a los 13°C.

Pese a las condiciones climáticas de frío y gran amplitud térmica, durante los meses de otoño y primavera se consiguió mantener condiciones de temperatura diurna y nocturna recomendadas para los cultivos seleccionados. Los meses críticos fueron los meses más fríos y más calientes del año, representados en junio y diciembre.

Durante los 4 días más fríos de junio se registraron temperaturas extremas durante la noche (desde -5°C a -8°C). Se pudo constatar que, pese a que las temperaturas del invernadero no entraron dentro del rango recomendado, no cayeron por debajo de la temperatura letal para cultivos presentada en la tabla 1, manteniéndose en 5°C a 3°C, registrándose una diferencia de 11 a 12°C entre el interior y el exterior. Esto significa que, en condiciones extremas bajo cero y heladas durante toda la noche, los cultivos podrían no presentar daños irreparables.

Esta situación puede, además ser mejorada controlando las pérdidas de calor, que en su mayor parte se producen a través de la cubierta transparente, ya sea planteando otra lámina de policarbonato para aumentar la aislación de cubierta, o incorporando una protección nocturna (por ejemplo, una cortina de tela o media sobra sobre la cubierta) que se use durante las noches del mes de junio.

Por otra parte, durante el mes de diciembre se pudo constatar que, sin una ventilación adecuada, las temperaturas del invernadero sobrepasan el límite recomendado (30°), llegando a los 39°C. La ventilación evidencia disminuciones considerables que alcanzan los 8°C aprox. en las temperaturas máximas y máximas medias del recinto.

Se demuestra que, mediante las mejoras introducidas en el diseño del invernadero (aberturas y rejillas de ventilación) se consigue un buen control de la circulación de aire durante los momentos de mayor temperatura exterior y valores máximos de radiación solar, logrando mantener la temperatura interior de la zona de cultivos dentro de rangos recomendados.

En cuanto a los sistemas de muros acumuladores evaluados (muro acumulador con vidrio simple y con DVH) se concluye que es recomendable utilizar el sistema con vidrio simple. En los meses fríos, cuando se necesita de mayor aporte de temperatura, por más que la diferencia entre ambos sistemas sea el doble, el aumento no es considerable, ya que ronda los 0.9°C a 1.8°C. Sería mejor invertir los sobrecostos asociados a la tecnología DVH en un sistema de protección de pérdidas para la cubierta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Católica de Salta (UCASAL) y a la Fundación Condor por el financiamiento de este proyecto. Además, se agradece al Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), en especial al Lic. José Quiñones, por su asesoramiento en el uso de software de simulación.

REFERENCIAS

- Abdo, E., y Szanto, A. (2009). La difusión de Invernaderos de altura con diseño mejorado en Nazareno Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 9*, 10.07-10.12.
- Álvarez Díaz, Mayta Huatuco, Rojas Rojas, Rosales Urbano, Rojas Lazo y Santos De la Cruz (2022). Prototipo de invernadero en zonas alto andinas del Perú para la producción de granos germinados como complemento dietético en la alimentación de camélidos sudamericanos. *Revista Universidad y Sociedad*, 14 (4), 708-717.

- Belmonte, S., Caso, R., Balderrama, B., y Flores Larsen, S. (2016). Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional: ciencia y tecnología para un futuro sustentable. Salta: Instituto de Investigación de Energía No Convencional. INENCO-CONICET.
- Combetto, Benedetti, y Pelicano. (2000). Invernaderos en comunidades rurales en la Puna Jujeña. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 4*.
- Echazú, Quiroga, Saravia, Astudillo, y Palacios. (2004). Diseño construcción y primeros ensayos de invernadero en El Rosal, Provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 8*, 02.43-02.48.
- Flores Larsen, S. (2019). *SIMEDIF 2.0 (Versión Beta). Manual de Usuario*. Salta: INENCO – U.N.Sa.-CONICET.
- Flores Larsen, S. (2020). SIMEDIF 2.0 (Versión Beta). Software para el cálculo del comportamiento térmico de edificios. Salta: INENCO – U.N.Sa.-CONICET.
- Iturry, L. (2002). *Manual de construcción y manejo de Walipinis y Panqar Huyu*. Brigham Young University. Provo, Utah: Benson Agriculture and Food Institute.
- Lenscak, M., y Iglesias, N. (2019). *Invernaderos. Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54)*. Buenos Aires, Argentina: INTA Ediciones. IPAF Región Pampeana.
- Martinez, P., y Roca, D. (2011). El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado. En R. Flores, y J. Victor, *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (págs. 181-247). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Quiroga, Echazú, Saravia, y Palacios. (2005). Simulación con SIMUSOL-LINUX de invernadero andino de El Rosal, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 9*, 02.25-02.30.
- Quiroga, M. y Echazú, R. (2016). Invernaderos y Energía Solar. En M. Laborde, & R. Williams, *Energía Solar*. Buenos Aires: ANCEFN- Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Quiroga, Palacios, Hoyos, y Echazú. (2016). Estudio Experimental de dos invernaderos andinos en El Rosal, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 20*, 02.21-02.29.
- Quiroga, Rojas, y Echazú. (1999). Cultivo de Flores en Invernadero Andino en Abra Pampa, Jujuy (3484 msnm). *XII Congreso de la Asociación Argentina de Horticultura*. Tucumán.
- Quiroga, Saravia, y Echazú. (1998). Invernadero Andino en Nazareno, Provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 3*, 02.21-02.25.
- Zanabria, P. (2015). Invernaderos sostenibles para la producción de hortalizas en zonas alto andinas del Cusco (Tesis de Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

DESIGN AND THERMAL SIMULATION OF AN ANDEAN SCHOOL GREENHOUSE IN ESTACION SALAR DE POCITOS, PROVINCE OF SALTA.

ABSTRACT: We propose the design and thermal behavior simulation of an Andean greenhouse destined for food production, located in the Public School "7 de Mayo" in Estación Salar de Pocitos, Province of Salta, Argentina. The aim of this study is to evaluate the greenhouse performance during 4 seasons of the year using SIMEDIF 2.0 to simulate indoors temperatures. Design improvements are included: openings and ventilation grilles, with possibility of closing, and trombe-type accumulator walls on the north façade, evaluating two alternatives: wall with an air gap and a single glass and wall with an air gap and HDG. The results are contrasted with daytime and nighttime temperatures recommended for crops. Favorable behavior can be seen during fall and spring months. During winter, facing extreme conditions below zero, interior temperatures manage to stay above crops *lethal temperature*. During summer, ventilation is required to reduce high temperatures and achieve recommended levels.

Keywords: greenhouse, technology, simulation and transfer.

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SISTEMAS DE PARASOLES PARA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN CLIMAS CON ALTA HELIOFANÍA

Alicia Betman¹, Julieta Balter¹, Marcos Hongn³, Carolina Ganem^{1,2}

1 Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), CONICET. Mendoza, Argentina

2 Facultad de Artes y Diseño (FAD), Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina

3 Laboratorio de Edificios Bioclimáticos. Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional. (INENCO) Facultad de Cs. Exactas. Universidad Nacional de Salta.

abetman@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN: En regiones caracterizadas por una elevada heliofanía, resulta esencial implementar sistemas eficientes de protección solar. Este artículo presenta un análisis paramétrico realizado mediante software de simulación, con el objetivo de analizar diferentes posibilidades de diseño geométrico de parasoles de una ventana de orientación norte. Se modificaron las variables de relación ventana-pared (WWR), profundidad, espaciado y ángulo de las lamas, obteniendo 81 iteraciones de posibles propuestas de diseño. Se evaluó el consumo energético anual para refrigeración, calefacción e iluminación, analizando la influencia de cada variable en el rendimiento. De manera significativa, la WWR resultó la más influyente en términos de desempeño energético, resaltando la importancia de un diseño consciente de las dimensiones de la ventana. Además, se subraya que un análisis detallado de las variables posibilita establecer una combinación adecuada para mejorar la eficiencia energética. Estos resultados ofrecen diversas posibilidades para optimizar el diseño, logrando un equilibrio entre el control solar y el ahorro de consumos energéticos.

Palabras clave: simulación dinámica, protecciones solares, eficiencia energética.

INTRODUCCIÓN

Frente a los desafíos actuales referidos al diseño de edificios sustentables y eficientes, el proceso de toma de decisiones arquitectónicas se vuelve cada vez más complejo debido a muchos factores que deben ser considerados. En este sentido, los métodos cuantitativos se han convertido en una parte vital del proceso de toma de decisiones, ayudando a evaluar las decisiones de diseño de un proyecto (Reinhart y Fitz, 2006). Es por esto que resulta necesario el establecimiento de vínculos entre la experiencia profesional y los conocimientos que se obtienen de las nuevas herramientas de simulación (Gercek y Arsan, 2019).

En este ámbito, los modelos paramétricos resultan una herramienta muy valiosa en relación a las oportunidades que ofrecen de explorar distintos escenarios y comprender mejor la relación entre las variables involucradas. Una de las principales ventajas de estos modelos, es la posibilidad de realizar transformaciones que resulten en diferentes configuraciones de los mismos componentes geométricos de un edificio. Esto, contribuye a proporcionar una interpretación de un modelo como un conjunto típicamente infinito de instancias, cada una determinada por una selección particular de valores para las variables independientes del modelo (Turrin et al., 2011 y Konis et al., 2016). En el campo de la arquitectura, existen diversas formas automatizadas de optimización, incluyendo algoritmos genéticos y algoritmos evolutivos que contribuyen a un espacio de búsqueda para descubrir alternativas de diseño arquitectónico que cumplan con ciertos criterios. Estos pueden ser utilizados para problemas de diseño

complejos que requieren muchas iteraciones, producen una miríada de variaciones y compensaciones y proporcionan métodos gráficos de evaluación (Konis et al., 2016; Toutou et al.; 2018).

En cuanto a la envolvente edilicia, las superficies acristaladas suelen ser el componente más débil y vulnerable a las condiciones exteriores dado que transmiten una cantidad significativa de radiación solar y absorben y remiten una parte considerable de calor en el espacio interior (Touma y Ouahrani, 2018). El diseño y dimensionamiento de las aberturas y/o ventanas de un edificio, son un vínculo clave entre la arquitectura y la gestión de la energía, según Yong et al. (2017). La relación ventana-pared (WWR por su sigla en inglés) y los parámetros del acristalamiento tienen un impacto significativo en la eficiencia energética y el confort térmico y visual de los espacios.

Es por esto que la optimización de dispositivos de sombreado en los edificios se ha convertido, desde hace mucho tiempo, en un tema ampliamente investigado debido tanto a su papel crítico en el diseño e integración de los elementos de sombra en la fachada, así como en su operación (Rizki et al., 2021). Un diseño eficiente de los mismos puede bloquear la radiación solar no deseada durante el verano y permitir su ingreso durante el invierno, situación que puede impactar en la reducción de los consumos energéticos para climatización. El correcto análisis de la orientación de la construcción, junto con las características climáticas del sitio, permite obtener herramientas para planificar la ubicación estratégica de sistemas de control solar, diseñando de esta forma la envolvente. A nivel arquitectónico y perceptivo, ésta es la entidad principal sobre la que se realizan la mayoría de los juicios estéticos. A nivel físico, la envolvente cumple la función de controlar y/o admitir los distintos elementos del entorno (calor, luz, aire, ruido, etc.) (Wafia et al., 2016).

En cuanto a los antecedentes sobre el tema, según Niu (2004), los dispositivos de protección solar exteriores que pueden proteger toda la superficie de vidrio logran reducir la ganancia solar directa hasta en un 80%. En el estudio, los investigadores concluyeron que los ahorros de energía asociados con esta estrategia son mayores en ciudades con alta radiación solar y temperaturas ambientales elevadas en verano. Para Krstić Furundžić et al. (2019) debido al proceso integral de toma de decisiones en el diseño arquitectónico, se debe encontrar un compromiso entre la energía, el diseño, la estética, la comodidad del usuario y los factores ambientales. Para los autores Koç y Maçka Kalfa (2021) el efecto de los dispositivos de control solar en el rendimiento energético de las construcciones se está convirtiendo en un campo de investigación cada vez más importante. Las investigaciones citadas han revelado la importancia de utilizar estos sistemas de protecciones en fachadas. Especialmente el uso de dispositivos externos es ventajoso en términos de ahorro de energía y de confort térmico y visual.

En función de lo expuesto, el objetivo del presente estudio consta en analizar diferentes posibilidades de diseño geométrico de parasoles de una ventana de orientación norte en un ambiente controlado, con el fin de valorar las mejoras resultantes en los consumos anuales de refrigeración, calefacción e iluminación en climas de alta heliofanía.

METODOLOGÍA

Las etapas metodológicas se basaron en el trabajo realizado por Nazari et al. (2023).

La Fig. 1 presenta el flujo de trabajo del estudio. Para la construcción del modelo se utilizó el software libre de diseño paramétrico Grasshopper, con el complemento visualizador de Rhinoceros 3D, software con licencia educacional por tres meses. Para realizar el análisis energético, se incorporó Ladybug y Honeybee. Estos complementos permiten la importación de datos climáticos de Energy Plus Weather Data EPW y resuelven los cálculos del modelo con motores de simulación reconocidos: OpenStudio, EnergyPlus, Daysim y Radiance.

Luego, para automatizar la iteración del análisis y guardar las capturas de pantalla se utilizó el complemento de Colibri. Esta herramienta fue desarrollada por Thornton Tomasetti (2019) y permite generar un gráfico interactivo de coordenadas paralelas para cada paso de la iteración con fines de exploración y visualización. A diferencia del proceso de optimización multiobjetivo donde la solución

deseada tiende a ser generada genéticamente en función del valor deseado, Colibri itera todas las posibilidades totales. De esta forma, se analizaron 81 combinaciones mediante el algoritmo mencionado.

El siguiente paso en el proceso de análisis es la importación de los datos generados en el Design Explorer para su visualización. Design Explorer es un panel de control en línea gratuito desarrollado también por Thornton Tomasetti (2019) que permite visualizar las imágenes por sus variables de entrada y salida. Por último, se analizaron los datos numéricos en Microsoft Excel.

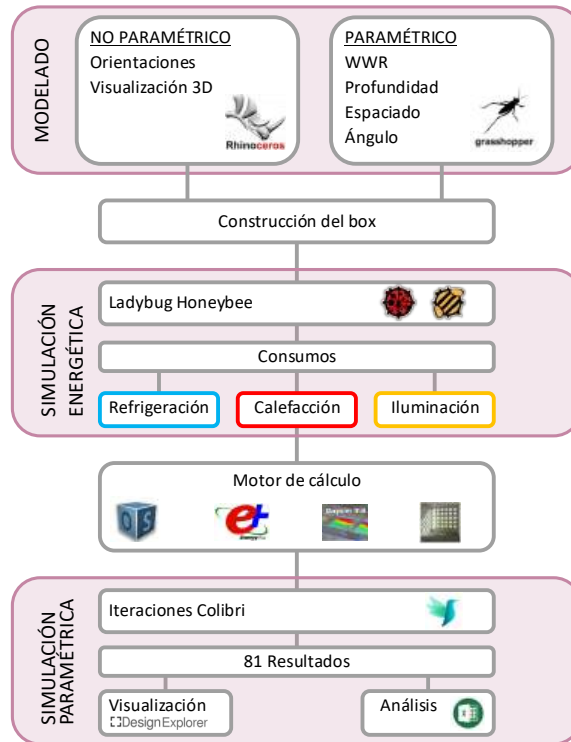


Figura 1. Flujo de trabajo. Fuente: Elaboración de los autores.

El sitio de estudio del presente trabajo corresponde al área del Gran Mendoza, ubicada a 32° 40' Latitud Sur, 68° 51' Longitud Oeste y 827 metros sobre el nivel del mar, en el piedemonte de la Cordillera de Los Andes. Emplazada en una zona semi-desértica y árida, presenta un clima templado árido continental con considerables variaciones estacionales y diarias. La región cuenta con una elevada heliofanía, con registros de radiación solar de 25.4 MJ/m² en diciembre (verano) y 9.10 MJ/m² en junio (invierno). Esta condición representa una oportunidad para el acondicionamiento pasivo de los espacios, siempre y cuando en el diseño de la envolvente se prevea una correcta relación entre los aventanamientos y los dispositivos de control.

El espacio de estudio propuesto corresponde a un box de 3.00 m por 3.00 m con una altura de 2.70 m. La construcción es en materiales típicos de la zona, especificados en la Tabla 1. El vidrio es simple con un espesor de 3 mm.

El período de corrida estudiado es anual. El archivo climático utilizado corresponde los datos de la estación meteorológica “El Plumerillo” Mendoza.

Tabla 1. Características constructivas. Fuente: Elaboración de los autores.

Construcción	Capas	MATERIALES MÁSCOS					MATERIALES NO MÁSCOS
		Rugosidad	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor Especifico	Resistencia térmica
			(m)	(W/m°C)	(Kg/m3)	(J/kg °C)	(m2-K/W)
Muro exterior	Revoque	Rugoso	0.025	1.16	1800	1000	
	Ladrillo	Medio Rugoso	0.2	0.81	1600	835	
	Revoque	Rugoso	0.025	1.16	1800	1000	
	Yeso	Suave	0.02	0.4	800	840	
Piso	Contrapiso	Rugoso	0.12	0.78	1600	780	
	Carpeta	Rugoso	0.12	0.78	1600	780	
Cubierta	Membrana						0.55
	Carpeta	Rugoso	0.12	0.78	1600	780	
	Lana mineral	Medio Rugoso	0.05	0.031	50	750	
	Machimbre	Medio Rugoso	0.25	0.11	600	1380	

Los valores de termostatos se seleccionaron de acuerdo a lo establecido por el Estándar ASHRAE 55; 21 °C y 26 °C con ropa típica propia para cada estación (0.9 clo y 0.5 clo respectivamente) durante actividad sedentaria (ASHRAE, 2009).

El setpoint de iluminación se consideró de 500 lx en un punto central a 0.80 m del piso con un esquema de uso diurno con 4 W/m² y en base a un *schedule* de encendido de 08:00 h a 23:00 h. No se consideran ganancias internas de equipos o personas.

La tasa de infiltraciones se supone constante con un valor de 1 renovación por hora (1 rph). Si bien en este estudio no se analiza la materialidad de las protecciones solares, sino más bien un análisis geométrico del sistema, se prevé el uso de materiales livianos con un espesor de 10 mm.

Para la relación ventana-pared (WWR), se consideró una abertura al norte con un WWR mínimo de 30%, como valor máximo un 90% y un valor intermedio de 60%.

Para analizar la incidencia solar, se utiliza el gráfico de sombreado del software Climate Consultant. Se seleccionó el ángulo solar correspondiente a las 12:00 hora solar del 21 de diciembre para conocer la máxima altura solar y, por ende, el mínimo requerimiento de profundidad de la protección. Para la localidad de Mendoza el valor de este ángulo corresponde a 82°. En consecuencia, se realiza el respectivo cálculo contemplando la situación más desfavorable, es decir una abertura con un WWR de 90%. Se obtuvo un valor de 0.35 m de profundidad (ver Fig. 2), valor que se va incrementando para las otras propuestas con un salto de 0.10 m hasta 0.55 m.

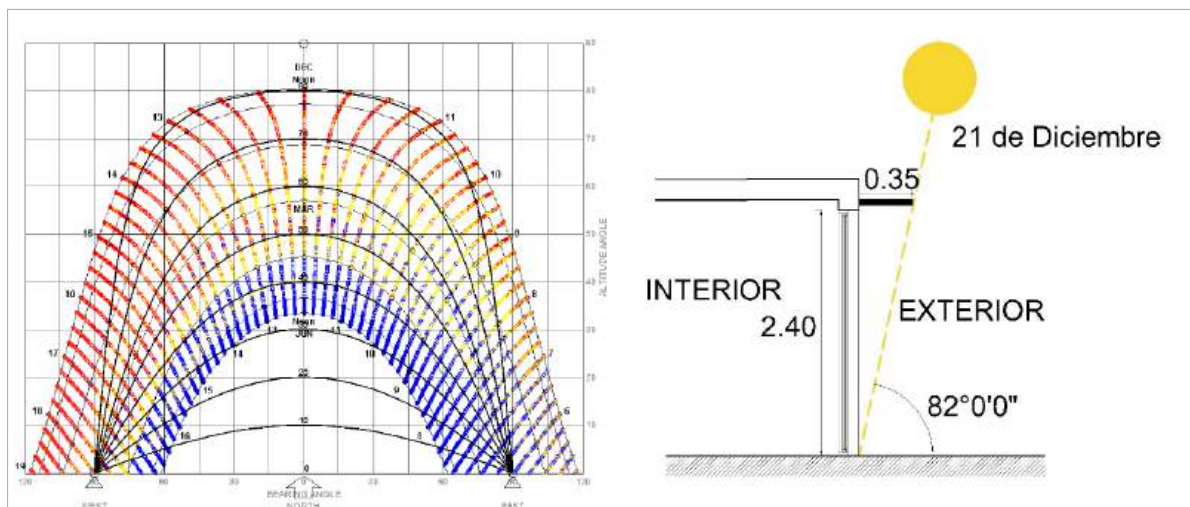


Figura 2. Cálculo de alero mínimo. Fuente: Software Climat Consultant. Elaboración de los autores.

La protección solar planteada para este estudio resulta un sistema modular de parasoles cuyas lamas están separadas equidistantemente. En consecuencia, para el espaciado se toman los valores establecidos en la profundidad, pensando para estudios futuros la implementación de dispositivos móviles. En cuanto al valor del ángulo de inclinación para las lamas se estudia la propuesta de 0°, es decir que el dispositivo se encuentra en posición horizontal, luego para una inclinación de 15° y posteriormente de 30°, para obtener mayor bloqueo de la radiación solar. Los intervalos propuestos en todas las variables fueron seleccionados en función de observar modificaciones interesantes y proporcionales al espacio, a los fines de este trabajo.

En la Tabla 2 se presentan los valores de los parámetros geométricos analizados.

Tabla 2. Variables de iteración. Fuente: Elaboración de los autores.

Parámetro	Intervalo	Rango	Valores	Total
WWR	30 (%)	30-90(%)	30-60-90(%)	3
Profundidad	10(cm)	0.35-0.55(m)	0.35-0.45-0.55(m)	3
Espaciado	10 (cm)	0.35- 0.55 (m)	0.35-0.45-0.55(m)	3
Ángulo	15°	0-30(°)	0-15-30(°)	3
Total de iteraciones				81

RESULTADOS

En la Fig. 3 se presentan los datos obtenidos del visualizador Design Explorer, que admite examinar los 81 escenarios posibles para este estudio. El mismo permite observar la combinación de variables de entrada al simulador: WWR (%), profundidad (m), espaciado (m), ángulo de inclinación (°); junto con las variables de salida: consumos de refrigeración, calefacción, e iluminación (kWh/m²).

Se puede observar que los valores de consumos de refrigeración tienen un mínimo de 60.6 kWh/m² y un máximo de 77.2 kWh/m². Es decir, la reducción de la carga de refrigeración es de 16.6 kWh/m² representando un 21%, al analizar los casos extremos. En cuanto a los consumos de calefacción, el valor mínimo es de 143.4 kWh/m² y el máximo de 214.3 kWh/m². En consecuencia, se puede disminuir 70.9 kWh/m² significando un 33%. Por otro lado, los consumos de iluminación presentan un mínimo de 13.8 kWh/m² y un máximo de 20.8 kWh/m². Por lo tanto, se puede reducir el consumo en 7 kWh/m² resultando un 34% menos.

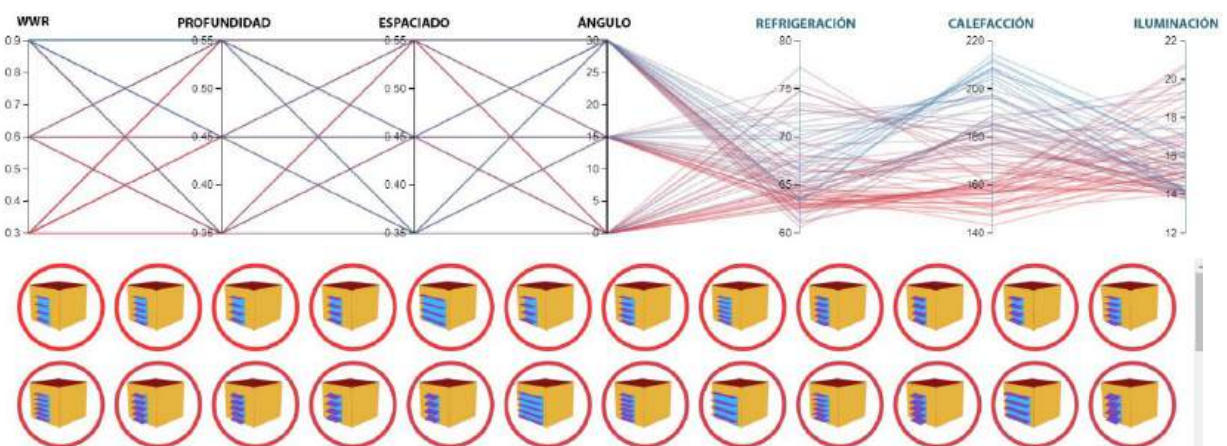


Figura 3. Visualización de datos en Design Explorer. Fuente: Elaboración de los autores.

En Fig. 4 se presenta un análisis de las tendencias generales observadas en cada una de las variables de estudio. En cada una de las variables se contempla todas las propuestas que respondan a la misma. Por ejemplo, para la variable WWR 0.3 se consideran todas las propuestas con: profundidad de 0.35 m a

0.55 m, espaciado de 0.35 m a 0.55 m, ángulo de 0° a 30°, y todas las posibles combinaciones entre ellas.

El incremento del WWR en la fachada norte, empleando diversos sistemas de protección, demostró un impacto significativo en el consumo de energía para calefacción. Si bien para refrigeración hay incrementos y en iluminación hay disminuciones, en este gráfico (Fig. 4) no se aprecian de manera contundente.

Se pudo constatar que, a medida que se aumenta la profundidad de las lamas, los valores de consumo energético también se incrementan. Este hallazgo sugiere que el aumento del sombreado ocasiona una mayor demanda energética, especialmente en lo que respecta a la calefacción, ya que la protección adicional limita la entrada de radiación solar y afecta el confort térmico.

Por el contrario, se observó que el incremento en el espaciado entre lamas resultó beneficioso para reducir el consumo de energía en calefacción. El aumento de la separación de las lamas permitió una mayor ganancia solar en invierno, lo que disminuyó la necesidad de activar el sistema de calefacción.

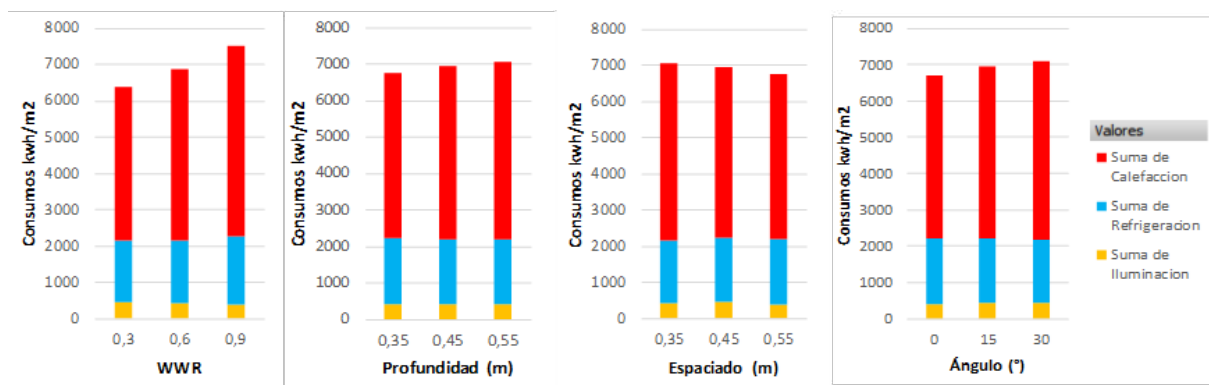


Figura 4. Consumo de energía anual desagregada para diferentes escenarios, en base a la variación de parámetros geométricos del sistema de protecciones: WWR, profundidad, espaciado y ángulo. Fuente: Elaboración de los autores.

En cuanto al ángulo de inclinación de las lamas, se pudo inferir que un aumento en dicho ángulo tuvo un efecto desfavorable en los consumos de energía, especialmente en el caso de la calefacción. Este resultado indica que un ángulo de inclinación más pronunciado limita la captación de radiación solar y, por ende, aumenta la demanda energética para mantener el confort térmico en el interior de la edificación.

En la Fig. 5 se presenta un diagrama de cajas y bigotes con todas las variables de análisis.

WWR

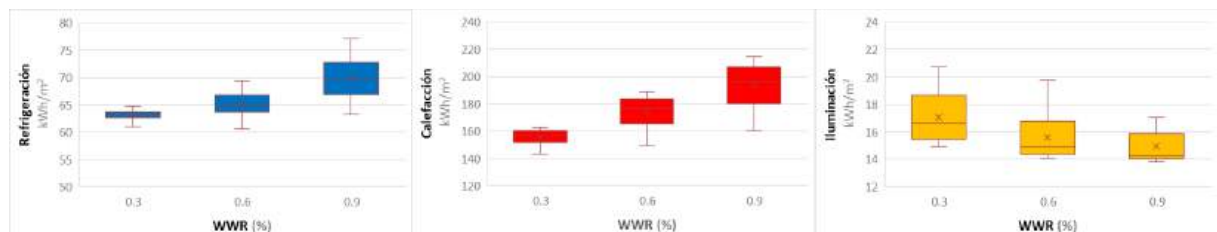


Figura 5. Diagrama de cajas y bigotes de la variable de iteración WWR. Fuente: Elaboración de los autores.

La variante de 30% de WWR presenta un rango intercuartílico muy pequeño en consumos de calefacción y refrigeración, resultando el escenario más favorable. Sin embargo, desde el punto de vista de consumo para iluminación el rango intercuartílico se incrementa notablemente, teniendo un máximo de 20.76 kWh/m², el valor máximo para la variable como era de esperarse.

La variante de 60% de WWR presenta mayor estabilidad en cuanto a los valores de refrigeración, sin embargo, analizando los requerimientos de calefacción presenta una asimetría de datos, con tendencia a los más altos, pero con un primer cuartil con una mínima de 149.4 kWh/m² resultando uno de los valores más bajos. En cuanto a iluminación cuenta con asimetría hacia los valores más bajos, con una mediana de 15.6 kWh/m².

La propuesta de 90% WWR presenta la mediana más alta con un valor de 69.8 kWh/m² para el caso de refrigeración. En cuanto a calefacción posee la caja desplazada hacia la parte superior, indicando definitivamente mayores consumos, logrando la máxima de 214.3 kWh/m². La mediana se sitúa en 193.1 kWh/m², siendo notablemente más alta que las otras propuestas.

Profundidad de lamas

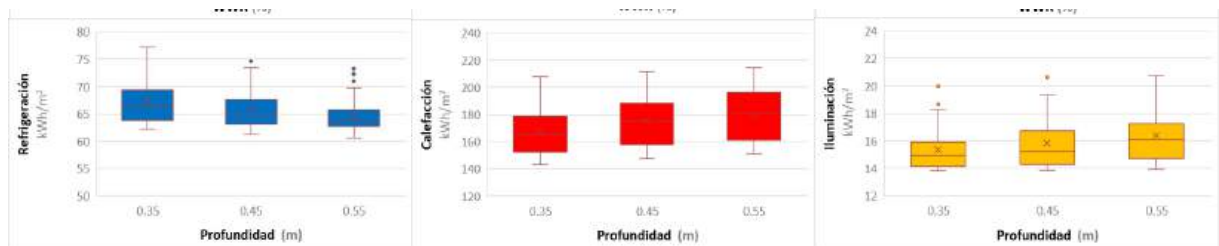


Figura 6. Diagrama de cajas y bigotes de la variable de iteración Profundidad. Fuente: Elaboración de los autores.

El incremento de la profundidad de 0.35 m a 0.55 m reduce los consumos de refrigeración de una mediana de 67.3 kWh/m², a valores más aceptables de 64.8 kWh/m². Sin embargo, en cuanto a la calefacción, se incrementa de una mediana de 167.7 kWh/m² a 179.9 kWh/m² y una máxima que alcanza 214.5 kWh/m². Desde el punto de vista lumínico, la profundidad también representa un aumento de la mediana de 15.3 kWh/m² a 16.3 kWh/m².

Espaciado de lamas

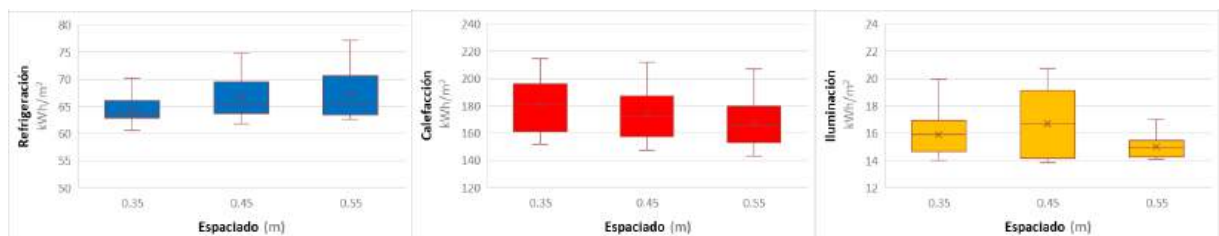


Figura 7. Diagrama de cajas y bigotes de la variable de iteración Espaciado. Fuente: Elaboración de los autores.

El espaciado de 0.35 m presenta la situación más favorable para refrigeración, con un rango intercuartílico estrecho. Sin embargo, para calefacción resulta de forma inversa. Tiene la mediana en 180.7 kWh/m² y una máxima de 240.2 kWh/m². Para iluminación presenta una máxima de 19.85 kWh/m² ubicando el tercer cuartil lejos de la mediana, establecida en 15.88 kWh/m².

El caso del espaciado a 0.45 m presenta valores intermedios tanto para refrigeración como para calefacción. Aunque el consumo mínimo anual de energía para iluminación ronda los 14 kWh/m² con cualquier propuesta de profundidad, para este caso la mediana asciende a 16.69 kWh/m², resultando el caso más desfavorable.

En cuanto al espaciado de 0.55 m en la variable de refrigeración la caja del diagrama se encuentra desplazada hacia la parte inferior, indicando una asimetría con respecto a la máxima de 77.2 kWh/m². Para calefacción, presenta la mediana más favorable ubicada en 167.5 kWh/m². Con respecto a la iluminación, presenta el rango intercuartílico más estrecho, y la mediana más propicia en 14.9 kWh/m².

Ángulo de inclinación de lamas

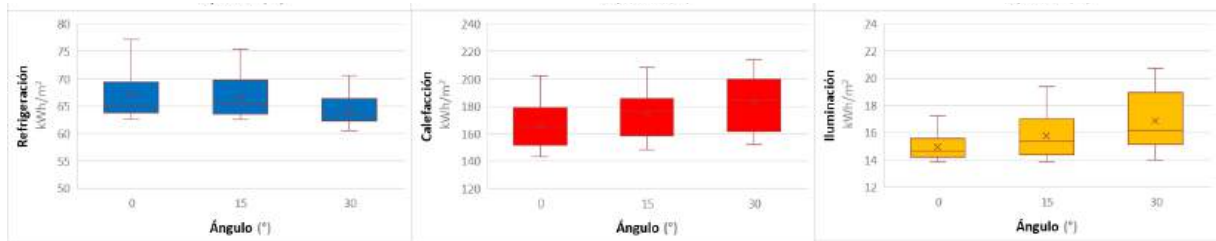


Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes de la variable de iteración Ángulo. Fuente: Elaboración de los autores.

Incrementado la inclinación de la lama de 0° hasta 30° hacia abajo, disminuye la mediana de refrigeración de 67.5 kWh/m² a 64.3 kWh/m², resultando el caso más favorable. Sin embargo, cambiar el ángulo a 30° aumenta el valor de la mediana de calefacción de 165.7 kWh/m² a 182.2 kWh/m². La misma tendencia se observa para el requerimiento energético en iluminación incrementando de 14.9 kWh/m² a 16.8 kWh/m².

A continuación, se presentan en las Figs. 9 y 10 los peores escenarios seleccionados entre los 81 resultados. Estos escenarios consisten en valores altos de consumo de energía del edificio correspondiendo a combinaciones a evitar en el diseño arquitectónico.

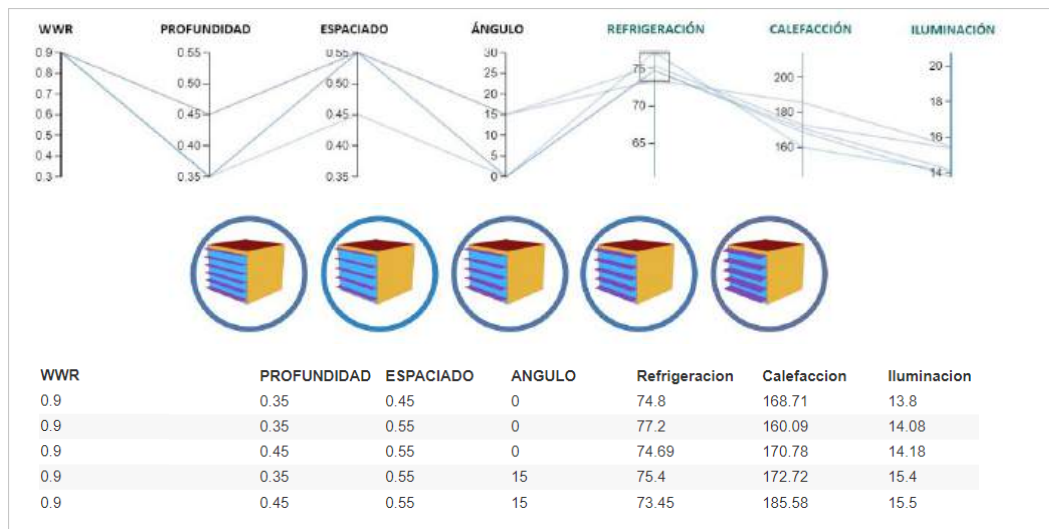


Figura 9. Casos más desfavorables para consumos de refrigeración. Fuente: Elaboración de los autores.

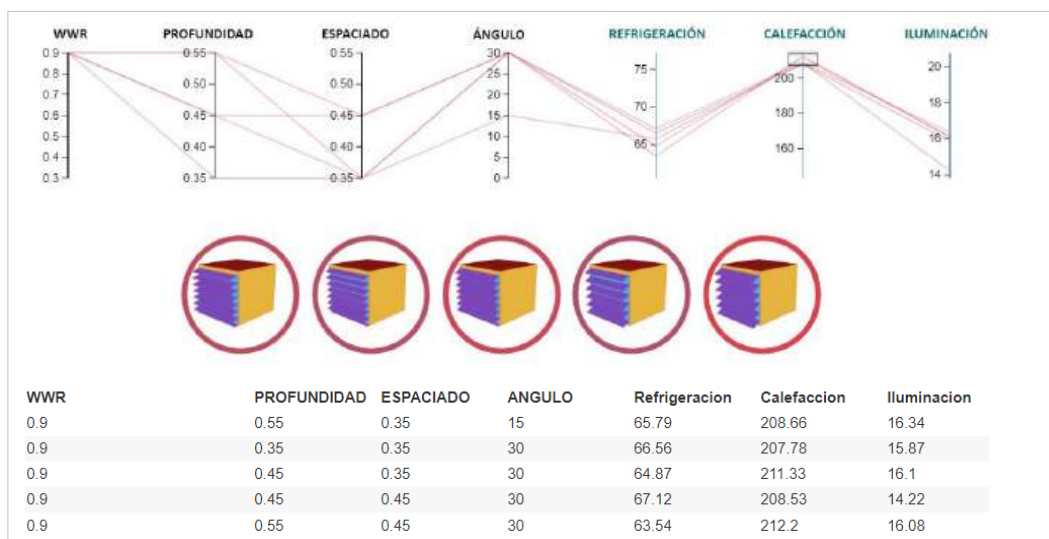


Figura 10. Casos más desfavorables para consumos de calefacción. Fuente: Elaboración de los autores.

En función a los resultados observado, los 5 casos más desfavorables para consumos de refrigeración y calefacción resultan en su totalidad con WWR de 90%.

Para refrigeración, el máximo consumo está dado por las propuestas que tienen la mínima profundidad (0.35 m) con un máximo espaciado (0.55 m y 0.45 m) y un ángulo de 0°, es decir que no logran bloquear el ingreso solar en su totalidad para la estación de verano.

Para calefacción, el máximo consumo está dado por las propuestas que incluyen la máxima profundidad (0.55 m y 0.45 m) con un mínimo espaciado (0.35 m) y un ángulo de 15° y 30° respectivamente, bloqueando el ingreso solar incluso en momentos del año que resulta necesario.

En las Figs. 11 y 12 se presentan los 5 casos más favorables de consumo energético respecto a la refrigeración y calefacción, respectivamente.

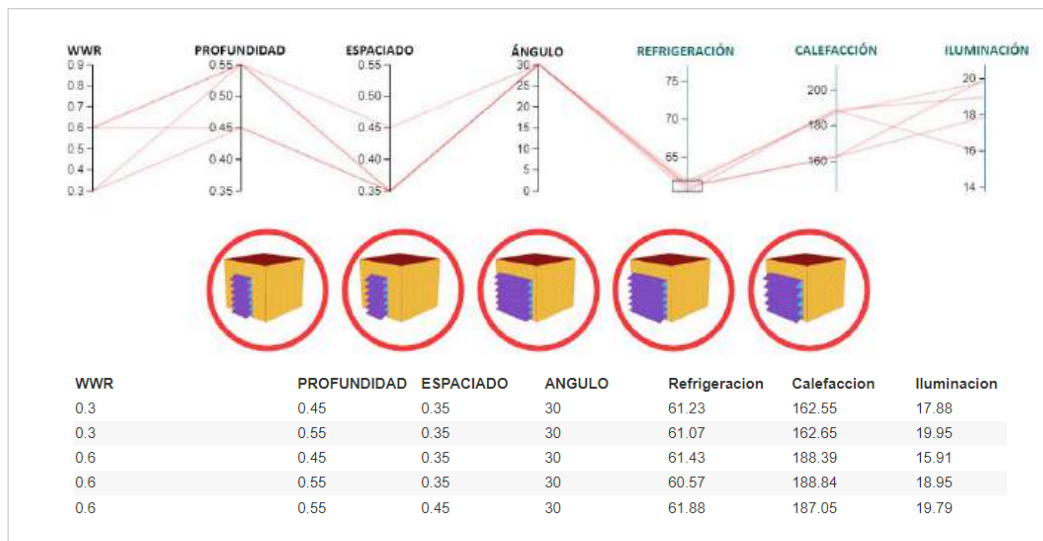


Figura 11. Casos más favorables para consumo de refrigeración. Fuente: Elaboración de los autores.

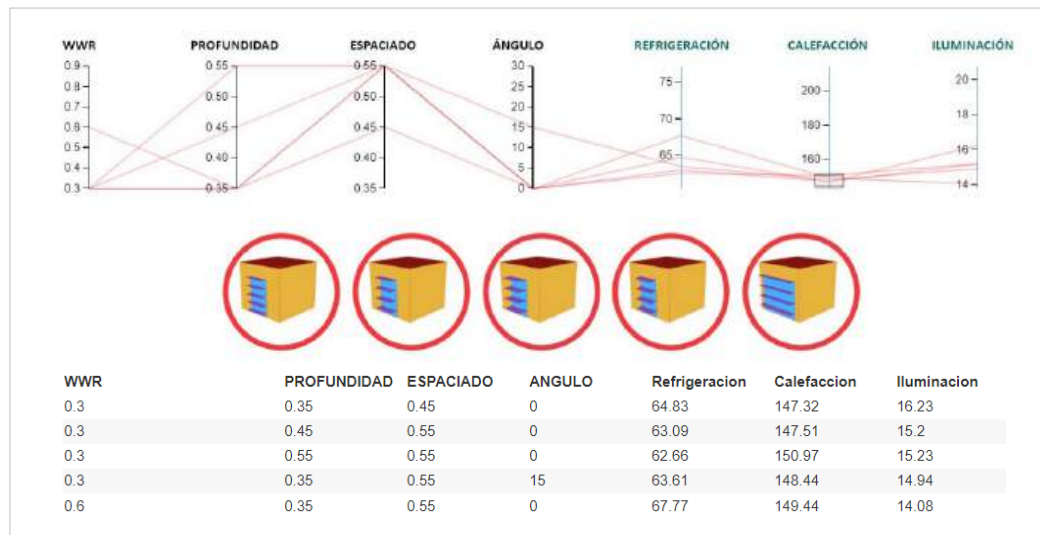


Figura 12. Casos más favorables para consumos de calefacción. Fuente: Elaboración de los autores.

De las 5 respuestas más favorables para refrigeración, 3 casos presentan un WWR de 30% y los otros 2 casos tienen aberturas de mayores dimensiones, en 60%. Resulta beneficioso la mayor cantidad de proyección de sombra posible, por lo tanto, las profundidades son altas, es decir 0.45 m y 0.55 m con espaciados pequeños (0.35 m) y un ángulo de inclinación de lamas en 30°.

En consecuencia, pueden considerarse las siguientes propuestas como posibles estrategias anuales:

- Para calefacción, 4 casos tienen un WWR de 30% y un 5to caso con un WWR de 60%. La primera propuesta consiste en un mínimo WWR 30% con una mínima profundidad 0.35 m y un espaciado intermedio de 0.45 m para un ángulo de inclinación de 0°. Seguida por una propuesta similar que amplía el espaciado a 0.55 m.
- La propuesta de WWR 60% que permite tener aberturas con mayores dimensiones, en su variable de profundidad de 0.35 m, espaciado de 0.55 m y un ángulo 0° consume 149.44 kWh/m². Es decir, 2.12 kWh/m² más que el caso más óptimo, representando una diferencia solo del 1.4%.
- En cuanto a la iluminación, la alternativa de la ventana de mayores dimensiones representa mejores condiciones lumínicas, consumiendo 14.08 kWh/m² un 13% menos que las otras propuestas.
- Resulta interesante que, si bien los casos más beneficiosos para minimizar los consumos de calefacción no coinciden con los óptimos de refrigeración, aun así, no representan escenarios del todo desfavorables. Condición que no se da de forma inversa, dado que los 5 casos óptimos de refrigeración poseen altos consumos de climatización en invierno, debido a su extendido sombreado.

CONCLUSIONES

Luego de analizar 81 posibilidades de resolución de ventana con sistema de protección de parasoles en la orientación norte para regiones de alta heliofanía, como Mendoza, se puede decir que la variable con más incidencia resulta ser WWR. En consecuencia, el tamaño de la abertura al momento del diseño del proyecto debe ser sumamente estudiada. Sin embargo, con un correcto análisis de las otras variables que componen al diseño del sistema de protección en sí, profundidad del dispositivo protección solar, espaciado y ángulo de lamas en el mismo, se pueden obtener buenos desempeños energéticos, brindando mayores posibilidades al momento del diseño.

Este estudio piloto subraya la importancia de la integración de herramientas de simulación paramétrica y visualización de datos en la toma de decisiones al momento de proyectar en arquitectura. La comprensión profunda de cómo diferentes variables afectan los resultados del análisis lleva a una concepción más eficiente de espacios, con un consumo energético reducido. Estos hallazgos subrayan la complejidad de la interacción entre las estrategias de control térmico y resaltan la necesidad de considerar un enfoque equilibrado en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles.

En consecuencia, para futuros estudios se podría considerar el estudio de soluciones de protección solar móviles con el fin de optimizar su rendimiento de acuerdo a las diversas condiciones a lo largo del año.

REFERENCIAS

- ASHRAE. (2009) Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Gercek, M., Arsen, Z. D. (2019). Energy and environmental performance based decision support process for early design stages of residential buildings under climate change. *Sustainable Cities and Societies* 48, 101580B <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101580>
- Koç, S. G., Maçka Kalfa, S. (2021). The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102653>
- Konis, K. Gamas, A. Kensek, K. (2016) Passive performance and building form: an optimization framework for early-stage design support, *Sol. Energy*. 125 161–179, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.020>

- Krstić-Furundžić, A., Vujošević, M., Petrovski, A. (2019). Energy and environmental performance of the office building facade scenarios. *Energy*, 183, 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.231>
- Mangkuto, R. Koerniawan, M. Apriliyanthi, S. Lubis, I. Atthallah. Hensen, J. Paramita, B. (2021) Design optimisation of fixed and adaptive shading devices on four façade orientations of a high-rise office building in the tropics. *Buildings*. 12, 1-25. <https://doi.org/10.3390/buildings12010025>
- Nazari, S. Keshavarz, P. Mohammadi, M. Sareh, P. (2023) A multi-objective optimization approach to designing window and shading systems considering building energy consumption and occupant comfort. *Engineering Reports*. e12726,1-39 <https://doi.org/10.1002/eng2.12726>
- Niu, J. (2004) Some significant environmental issues in high-rise residential building design in urban areas, *Energy Build.* 36, 1259-1263. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.07.005>
- Thornton Tomasetti, Design Explorer <https://tt-acm.github.io/DesignExplorer/> Recuperado de URL el 12 de julio de 2023.
- Touma, A. Al, Ouahrani, D. (2018). The selection of brise soleil shading optical properties for energy conservation and glare removal: A case study in Qatar. *Journal of Building Engineering*, 20, 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.08.020>
- Toutou, A., Fikry, M., Mohamed, W. (2018). The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. *Engineering Journal*, 57, 3595–3608. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.04.006>
- Turrin, M. Von Buelow, P. Stouffs, R. (2011) Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms, *Adv. Eng. Inform.* 25, 656–675. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.009>
- Wafia, M., Azeddine, B., Amar, B. (2016). Bilateral Central Core and an External Envelope and its Impact on the Thermal Behaviour of Individual Self-construction Housing in the City of Biskra. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 328–335. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.029>
- Yong, S. Kim, J. H. Gim, Y. Kim, J. Cho, J. Hong, H. Baik, Y. Koo, J. (2017) Impacts of building envelope design factors upon energy loads and their optimization in US standard climate zones using experimental design. *Energy Build.* 141, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.032>

PARAMETRIC STUDY OF SHADING DEVICES SYSTEMS FOR REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION IN HIGH HELIOPHANY CLIMATES

ABSTRACT In regions characterized by high heliophany, the implementation of efficient solar protection systems is essential. This article presents a parametric analysis conducted through simulation software, aiming to explore different geometric design possibilities for north-facing window shading devices. The variables of window-to-wall ratio (WWR), depth, spacing and angle of the louvers were modified, obtaining 81 iterations of possible design proposals. The annual energy consumption for cooling, heating and lighting was evaluated, analyzing the influence of each variable on performance. Significantly, WWR emerged as the most influential variable in terms of energy performance, underscoring the importance of a conscientious design of window dimensions. Furthermore, it is emphasized that a detailed analysis of the variables makes it possible to establish an appropriate combination to improve energy efficiency. These results offer several possibilities to optimize the design, achieving a balance between solar control and energy savings.

Keywords: Dynamic Simulation, Solar Shading, Energy Efficiency

PISO RADIANTE DE HORMIGÓN CON AGUA ENCAPSULADA Y RECIRCULACIÓN AUTÓNOMA, PRIMEROS AVANCES

Nicolás Di Lalla, Andrés E. Díaz, Alejandro L. Hernández

INENCO (UNSa-CONICET), Av. Bolivia 5150, CP A4400FVY, Salta, Argentina.

Tel. 0387 425-5410 e-mail: ndilalla@gmail.com

RESUMEN: Se presentan los avances en el desarrollo de un nuevo sistema calefactor de piso radiante. El mismo se basa en un piso de hormigón que posee en su interior agua encapsulada en botellas de plástico. El calentamiento del piso se realiza a través de circulación de agua caliente por un espiral de manguera de PEBD que también está incrustado en el hormigón. El hormigón y el agua encapsulada conforman una masa térmica de acumulación por calor sensible. Este piso radiante fue diseñado para que opere totalmente autónomo de la red (gas o electricidad). El calentamiento es a través de colectores solares térmicos, que pueden ser autoconstruidos, y la impulsión del agua recirculante es por una bomba energizada por un panel fotovoltaico de muy baja potencia. Conformándose un sistema automatizado simple y económico. Para evaluar la factibilidad de la idea se armó un piso prototipo de menor área 1 m x 1 m x 0,15 m. Usándose una relación de volúmenes de agua encapsulada y hormigón $V_a/V_H=0,33$. Como característica básica de diseño se buscó que en invierno la superficie del piso se mantenga en el rango higrotérmico de 18°C a 29 °C. Esto pudo lograrse utilizando una relación de 0,5 m² de superficie de colección solar/m² de piso radiante.

Palabras clave: piso radiante, recirculado, fotovoltaico.

INTRODUCCIÓN

Consideraciones higrotérmicas

Se ha comprobado que los sistemas de calefacción por piso radiante son los más saludables ya que no resecan el aire de la habitación y no levantan el polvo como lo hacen los sistemas de radiadores. Además, el sistema de piso radiante es silencioso y se encuentra oculto de la vista no interfiriendo con la decoración. En cuanto a la circulación del fluido calo portador existen dos tipos de pisos radiantes, por circulación con aire, o con agua (denominado hidrónico). En cuanto a la acumulación de calor pueden ser utilizados materiales de cambio de fase (Liua et al., 2022); o simplemente, acumular por calor sensible en el mismo hormigón, o en el hormigón con agua encapsulada (Viegas et al., 2018). En todos los casos se ha establecido que del calor que aporta al ambiente, un 60% de la transferencia es por radiación y un 40% es por convección (Bilgen et al., 2002).

Para mantener los rangos de temperatura de confort, tanto para calefacción como para refrigeración edilicia, se requiere un cierto consumo de energía. La arquitectura bioclimática busca que el aporte de esa energía sea preferentemente por fuentes renovables, que su aprovechamiento se realice con buena eficiencia energética y que el impacto ambiental sea el menor posible. En este sentido en este trabajo se explora la posibilidad de elaborar, a bajo costo, un sistema de piso radiante hidrónico acumulador de calor cuya fuente de energía es el sol.

Por otra parte, desde el punto de vista del diseño arquitectónico, es necesario lograr ambientes saludables y seguros, con interiores que brinden el suficiente confort térmico (o comodidad higrotérmica), ya que la gente pasa cerca del 90 % del día en ellos, (Klepeis et al., 2001). Como se sabe, en un estado de confort térmico se mejoran la productividad física y mental del ser humano. Fisiológicamente, un estado de comodidad higrotérmica es aquel en el que, estando con una indumentaria ligera y realizando una actividad sedentaria, no intervienen los mecanismos termo reguladores del cuerpo.

Desde otro punto de vista, la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) definió al confort térmico como la condición en que una persona manifiesta satisfacción con el ambiente en el que se encuentra (ANSI/ASHRAE, 2004). Por supuesto que las condiciones de satisfacción son subjetivas, y no son iguales para todos, por lo que se requiere hacer estudios estadísticos de campo para establecer qué porcentaje de personas estarán térmicamente cómodos en ciertas condiciones ambientales. En este sentido en la década de los 70' Fanger (Fanger, 1970) comenzó estudios estadísticos en cámara de clima controlado que combina las teorías del balance de calor con la fisiología de la termorregulación (sudor, temblor, flujo de sangre). Se buscó determinar un rango de temperaturas de comodidad denominada condición de neutralidad térmica. De los resultados se pudo inferir que para garantizar que al menos el 90% de los ocupantes se sientan térmicamente satisfechos se recomiendan los valores de temperaturas de la Tabla 1, (Orosa, 2009).

Tabla 1. Recomendaciones de confort térmico resultados del estudio estadístico de Fanger, (a una humedad relativa del 50%, una tasa metabólica de 1,2 met. El aislamiento de la ropa se definió como 0,9 clo en invierno y 0,5 clo en verano).

Época del año	Temperatura nominal de diseño del aire °C (a la altura media de la habitación)	Rango de temperatura del aire aconsejado °C
Verano	22	20-23
Invierno	24,5	23-26

Metodología

Es importante hacer notar que los sistemas convencionales de calentamiento por estufas producen un calor desigual en la habitación, con temperaturas del aire más altas cerca de los techos, desaprovechándose gran parte de esa energía. En contraposición, las utilizaciones de sistemas de calentamiento por pisos radiantes calientan si generar una gran estratificación de temperaturas en la habitación, y da como resultado un gradiente de temperatura en altura que se aproxima a la curva ideal de confort (Woodson, 1999), Fig.1.

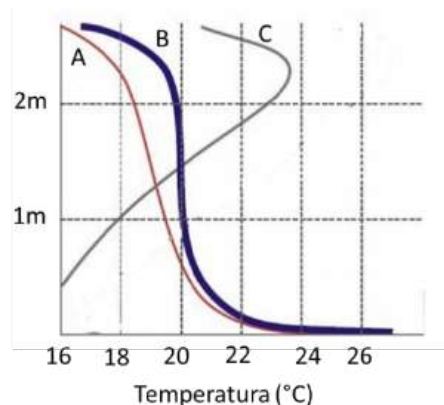


Figura 1. Gradiente vertical de temperaturas. A: curva ideal de confort humano., B: curva obtenida por calefacción por piso radiante. C: curva obtenida por radiador.

En este sentido, la Norma UNE-EN ISO 7.730 2006 establece la expresión que da el índice porcentual de incomodidad (porcentaje de insatisfechos "PD") por gradiente térmico vertical en una habitación, Ec. (1) (Laffón et al., 2007). Esta expresión es válida para $\Delta T < 8 \text{ }^\circ\text{C}$, siendo ΔT la diferencia vertical de temperatura entre la cabeza y los pies, su gráfica se observa en la Fig. 2.

$$PD_{\Delta T} = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856\Delta T)} \quad (1)$$

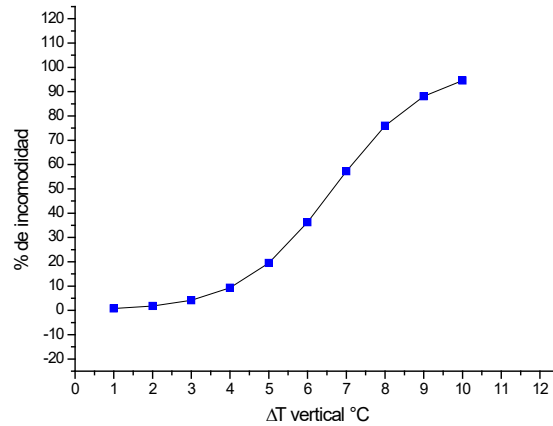


Figura 2. Índice porcentual de incomodidad por diferencia de temperaturas entre la cabeza y los pies.

También habrá que tener en cuenta la incomodidad producida por un piso muy frío o muy caliente, la expresión que da el porcentaje de personas descontentas por esta incomodidad es la Ec. (2) (Laffón et al., 2007), T_s en °C es la temperatura superficial del suelo. La Fig. 3 muestra la gráfica correspondiente.

$$PD_{T_s} = 100 - 94 \exp(-1,387 + 0,118T_s - 0,0025T_s^2) \quad (2)$$

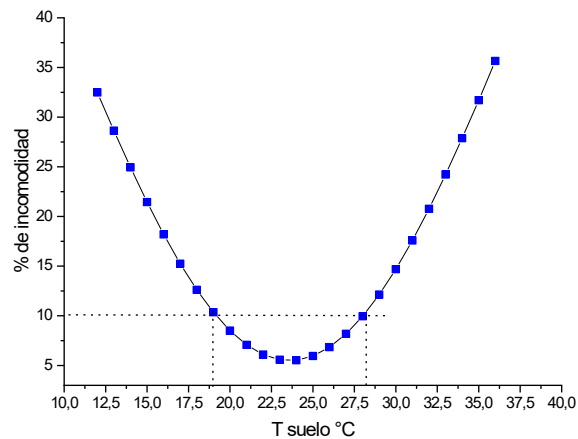


Figura 3. Gráfica que muestra el porcentaje de personas descontentas por incomodidad ocasionada por la temperatura del piso.

De esto último podemos decir, por ejemplo, que un piso que durante una jornada varíe su temperatura en el rango 18-29 °C satisfará cerca del 90% de las personas. Estos valores fueron tenidos en cuenta en el diseño presentado en este trabajo.

DISEÑO DEL PISO RADIANTE

Piso radiante propuesto

El objetivo de este trabajo es proponer un diseño de piso radiante que obedezca al concepto de "tecnología apropiada" (Turner, 1972). En orden a esto, el diseño se basó en obtener un sistema fácil de construir, que demande menos recursos, un menor costo, y genere menor impacto sobre el medio ambiente respecto a otras tecnologías convencionales, para ser aplicado en la construcción de viviendas bioclimáticas.

La idea propuesta se basa en un piso radiante que opere por acumulación por calor sensible; el piso está compuesto por hormigón con cierta masa de agua encapsulada en botellas recicladas de plástico PET. Ambas sustancias constituyen la masa térmica acumuladora de calor. La idea se completa con la implementación de un sistema de recirculación totalmente autónomo de la red, a través de un bombeo fotovoltaico de muy baja potencia. La recirculación del agua caliente es proveniente de colectores solares, y se realiza a través de una manguera plástica (PEBD) de 3/4" K4 en forma de espiral empotrada en el hormigón. Una aislación térmica por los laterales y la base del piso asegura que el flujo de calor sea mayoritariamente a través de su parte superior. La Fig. 4 muestra un esquema del concepto propuesto.

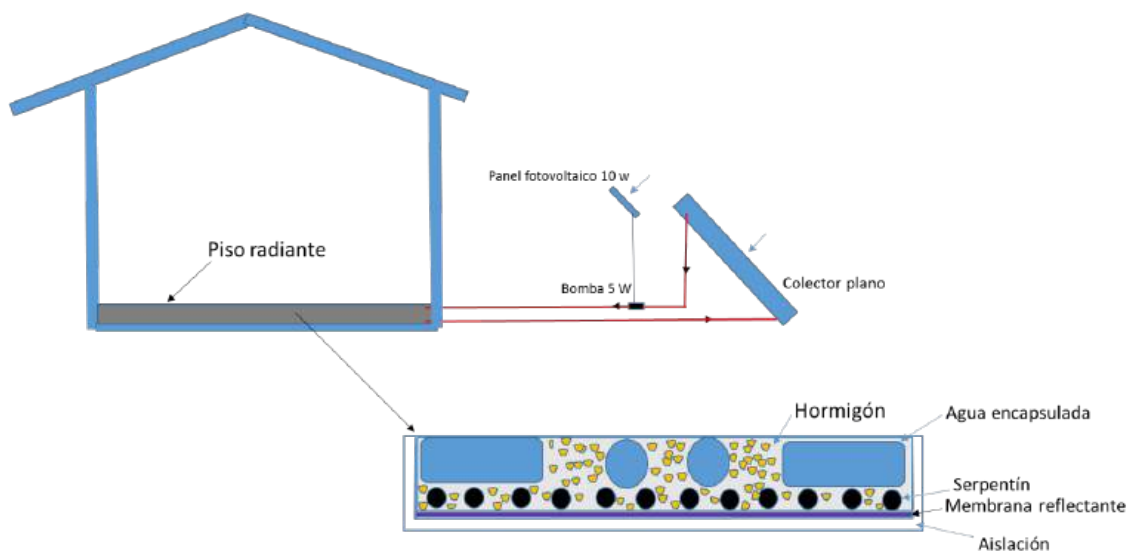


Figura 4. Esquema del piso radiante acumulador autónomo propuesto en este trabajo.

Para evaluar la factibilidad práctica de la idea, se elaboró un piso prototipo a escala (1m x 1 m x 0,15 m) que fue evaluado térmicamente. Se consideró que la proporción de volumen de agua encapsulada en comparación con el del hormigón no sea tan elevada como para comprometer la resistencia del piso. Fundamentalmente, la idea fue determinar las relaciones entre la masa de agua encapsulada, la masa de hormigón y el área de colección del calentador solar, para obtener en la superficie del piso una temperatura en el rango 18-29°C en época invernal. O sea, que el calor acumulado durante el día no produzca un sobrecalentamiento del piso, y sea suficiente para poder entregarlo de noche a una habitación.

Estimación de la masa térmica del piso y área de colección solar requeridas

La idea de incorporar agua encapsulada al piso de hormigón, es debida a sus mejores propiedades de acumulación térmica. El reemplazo de un cierto volumen de hormigón por su equivalente en agua significa un incremento del 130% de masa térmica (M_T). Esto se desprende de la comparación de las propiedades del hormigón y del agua, Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físico-térmicas del hormigón y del agua.

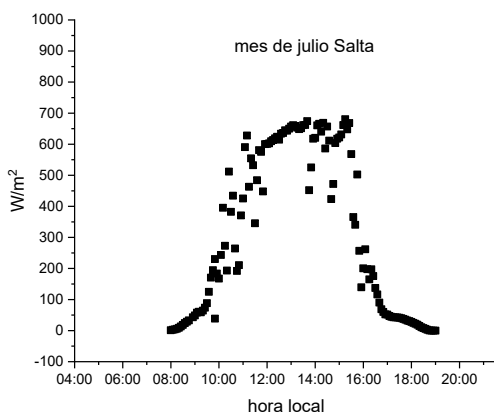
Material	δ (Kg/m ³)	Cp (J/Kg°C)	$M_T = \delta V C_p$ por m ³ de material (J/°C)
Hormigón	2100	880	1.848.000
Agua	1000	4180	4.180.000
			$M_{T\text{agua}}/M_{T\text{hormigón}} \approx 2,3$

Para determinar la masa de agua encapsulada a utilizar en el piso prototipo, se realizó una estimación previa a través de una simulación térmica. Se buscó determinar las proporciones requeridas entre el volumen de agua a encapsular "V_a" en el volumen total del piso "V_T", y el área de colección solar necesaria "A", para que el piso no sobrepase los 29°C en un día típico de invierno. Para ello se tuvo en cuenta el balance de energía de la Ec. (3). Este balance contempla la energía solar convertida en calor por un colector de placa plana auto construido con un rendimiento global de conversión fototérmica de $\eta = 0,38$, la energía acumulada por la masa térmica total, y la energía que se disipa al ambiente por el área superior del piso "A_p".

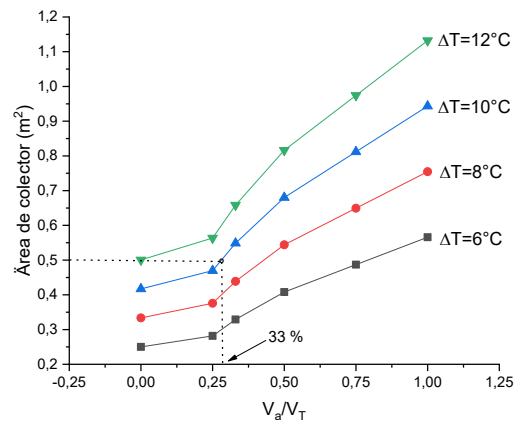
$$E A \eta = (V_h \delta_h C_{p_h} + V_a \delta_a C_{p_a}) \Delta T + h A_p (T - T_a) \quad (3)$$

"h" es el coeficiente de transferencia de calor total (radiación + convección) de la superficie del piso, tomándose para esta simulación un valor de $h=8\text{W/m}^2 \text{ K}$ (Meijje et al., 2022). "T_a" es la temperatura ambiente. "E" es la energía diaria que llega, en invierno, en un plano de 1m² inclinado 45° (ángulo en el cual se ubicará el colector). Para este dimensionamiento se utilizó un valor estándar de insolación para el mes de julio en la ciudad de Salta de 12,7 MJ/m²día en plano horizontal, este valor es la integración de los datos de irradiancia mostrados en la Fig. 5a.

Siendo que, el volumen total del piso "V_T" es 1 m x 1 m x 0,15 m = 0,15 m³ o sea, es la suma del volumen del hormigón "V_h" más el del agua encapsulada "V_a", resulta $V_h = V_T - V_a$. Entonces reemplazando V_h en la Ec. (3) se obtuvo una relación con la cual se elaboró un gráfico de A versus la relación V_a/V_T (Fig. 5 b). En este gráfico se muestran las curvas para distintos posibles saltos térmicos diarios del piso "ΔT" = 6, 8, 10 y 12°C, en todos los casos se consideró una temperatura ambiente de 21°C.



(a)



(b)

Figura 5. (a): Irradiancia típica del mes de julio para un día claro en la Ciudad de Salta. (b): Área de colector requerida Vs proporción de agua encapsulada en el hormigón.

Para ensayar experimentalmente, del gráfico de la Fig.5b se seleccionó una proporción de volúmenes de $V_a/V_T = 0,33$ y un salto térmico diario para el piso de 10°C. Con lo que en principio se necesitaría

un área de colección solar de aproximadamente 0,5 m². El ensayo de un prototipo con las medidas elegidas nos servirá para poder determinar si el piso se mantiene en el rango de temperaturas de diseño de 18-29 °C.

Simulación térmica del calentamiento y enfriamiento del piso radiante

Se realizó una simulación térmica preliminar del calentamiento y el enfriamiento considerando un piso de hormigón con 33% de su volumen con agua encapsulada, y se lo comparó con uno con 100% de hormigón. En los cálculos se supuso una distribución uniforme de temperatura en el piso. Se tuvo en cuenta el balance térmico dado por la Ec. (4), la misma considera que la potencia entregada al piso "P", se reparte como calentamiento del piso y como pérdida de calor al ambiente.

$$P = M_T dT/dt + hA(T-T_a) \tag{4}$$

Resolviendo la Ec. (4) se obtiene la temperatura instantánea del piso "T(t)" durante el calentamiento y el enfriamiento Ec. (5) y Ec. (6) respectivamente.

$$T(t) = T_o + P/hA_p [1 - \exp(-hA_p t/M_T)] \tag{5}$$

$$T(t) = (T_o - T_a) \exp(-hA_p t/M_T) + T_a \tag{6}$$

Donde T_o es la temperatura inicial del piso y T_a es la temperatura ambiente, además, la potencia media P suministrada al piso durante una jornada solar se tomó a acorde a la gráfica de la Fig. 5a. Se consideró un ambiente a una temperatura de 21°C y un h=8W/m² °C. La simulación comparativa obtenida se muestra en la Fig. 6. Se observa que el bloque de hormigón en una jornada de invierno sobrecalentaría a valores cercanos a los 34°C perdiéndose comodidad higrotérmica. Mientras que el reemplazo del 33% del volumen por agua encapsulada en principio cumpliría con los requisitos de diseño propuestos de mantener la temperatura del piso en el rango 18-29 °C.

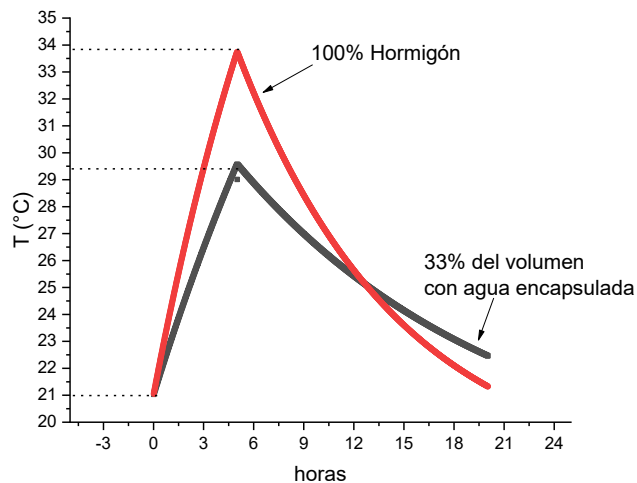


Figura 6. Comparación térmica simulada de la evolución de temperatura del piso en las dos situaciones.

PARTE EXPERIMENTAL

Elaboración del prototipo de piso radiante para ensayar

El piso prototipo fue elaborado acorde a la disposición y medidas mostradas en la Fig.7. La proporción de volumen de agua encapsulada utilizada fue de V_a/V_T = 0,33. El hormigón fue preparado con cemento,

arena y grava en una relación en volumen de 1:3:3. Antes de los ensayos al hormigón se lo dejó fraguar por 28 días.

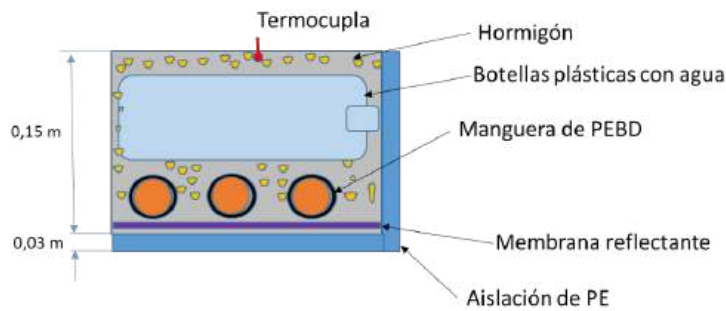


Figura 7. Disposición de los elementos en el piso prototipo.

El serpentín con forma de espiral para la recirculación del agua fue realizado con 15 m de manguera de PEBD K4 de 3/4". Para asegurar que el flujo de calor sea por la cara superior del piso, el prototipo fue aislado en la parte inferior y en los lateralmente con placas de poliestireno expandido (PE) de 25 Kg/m³ de 3 cm espesor. La aislación de la parte inferior del piso fue reforzada con una membrana de espuma de polietileno reflectante de 5 mm de espesor puesta por encima de la placa de PE.

El colector

Para el ensayo del piso radiante se elaboró un colector solar de placa plana de bajo costo de medidas externas 0,90 m x 0,60 m dando un área de colección efectiva de 0,52 m². Su absorbedor se realizó con chapa galvanizada de calibre 25, pintada de negro mate. Y para la circulación del agua por el colector, sobre esta chapa absorbedora fueron fijados 4 ramales en paralelo de manguera negra de PEBD K4 de 3/4". La aislación se realizó con poliestireno expandido de 25 Kg/m³ de 3 cm de espesor. La cubierta fue realizada con policarbonato alveolar de 4 mm de espesor.

Para estimar el rendimiento de conversión fototérmica del colector este fue conectado a un tanque con 40 litros de agua convenientemente aislado del exterior con 5 cm de PE de 25Kg/m³. El colector fue ubicado en un ángulo de 45° mirando al Norte e interconectado al tanque por intermedio de una bomba de 2 W para la recirculación del agua. El ensayo consistió en registrar la evolución de temperatura del agua del tanque (T_T) y así calcular el calor útil aportado al agua cada una hora. Además se midió la radiación solar en el plano del colector, y la evolución de la temperatura del ambiente externo (T_a). El ensayo se realizó en un día típico del mes de julio en la ciudad de Salta, el día del ensayo se registró una irradiancia máxima al mediodía de 680W/m² y la temperatura ambiente varió entre 10°C < T_a < 12 °C. La Fig. 8 muestra la gráfica del rendimiento en función del salto térmico $T_T - T_a$ experimentado durante esa jornada. El rendimiento medio del colector fue estimado en 0,38, valor utilizado en los cálculos para este trabajo.

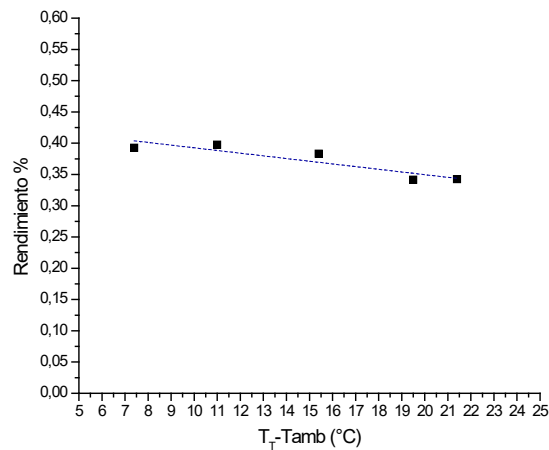


Figura 8. Rendimiento de conversión térmica del colector elaborado para el ensayo del piso radiante.

La bomba de recirculación y el panel fotovoltaico

Para la recirculación del agua, en el circuito conformado por el colector solar y el serpentín empotrado en el piso, se utilizó una mini bomba de 2 W y 12 V (Fig. 9). En este caso esta potencia de bombeo es suficiente debido a la pequeña carga hidrodinámica presentada por los 15 m de manguera del serpentín. Este tipo de bomba posee cojinetes cerámicos y pueden trabajar con agua a $T < 60^\circ\text{C}$, en nuestro caso la temperatura de trabajo está muy por debajo de este valor, ya que el piso estará siempre a $T < 30^\circ\text{C}$. La mini bomba puede conseguirse en el mercado actual por unos \$ 8.000, y según los datos del fabricante la vida útil es de 30.000 horas. En cuanto al panel fotovoltaico se utilizó uno de 5 W_p, que fue suficiente para comenzar a energizar a la bomba a partir de un valor umbral de irradiancia de 60 W/m², lo cual ocurre prácticamente a las 9:00 hs. El máximo caudal aportado por la bomba al mediodía es de aproximadamente 1,3 L/min para una irradiancia aproximada de 800 W/m². La Fig. 9 también muestra la foto del piso radiante conectado al colector solar y al panel fotovoltaico.



Figura 9. Foto de la mini bomba utilizada para la recirculación, y del piso radiante conectado al colector solar.

MEDICIONES EXPERIMENTALES

Para la evaluación térmica del piso prototipo en todos los ensayos se empleó para la recirculación la bomba y el panel fotovoltaico mencionados, posicionado este último fijo en un ángulo de 45° mirando al Norte. Y como se dijo, se utilizó un colector de 0,52m².

Estimación del coeficiente de transferencia h del piso

Primeramente, se estimó el coeficiente de transferencia de calor de la superficie del piso "h". Para ello, se calentó el piso y luego se lo dejó enfriar, registrándose simultáneamente las temperaturas instantáneas de su superficie y del ambiente. Asumiendo un enfriamiento exponencial se graficó $\ln(T(t)-T_a)$ Vs tiempo. De la regresión lineal se obtuvo un valor de $h = 7,5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, un valor cercano al usado en la estimación del área de colección, Fig. 10.

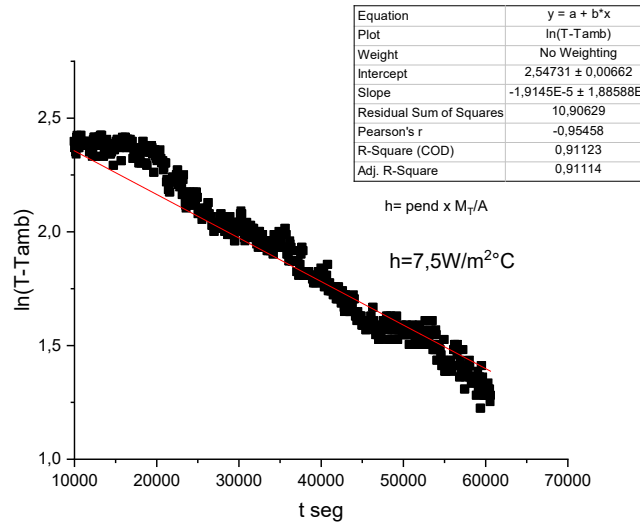


Figura 10. Estimación del coeficiente de pérdidas global del piso.

Ensayo de calentamiento del piso radiante

El ensayo de calentamiento se realizó bajo los valores horarios de irradiancias mostrados en la Tabla 3. Esta tabla también muestra los valores de caudal suministrado al serpentín por la bomba durante el ensayo. La Fig. 11 muestra la evolución diaria de la temperatura del piso, se observa que al finalizar la jornada solar alcanza una temperatura máxima de 29°C , satisfaciendo esta pauta de diseño. En la experiencia la temperatura ambiente externa se mantuvo entre 20 y 21°C .

Tabla 3. Datos de irradiancias y caudales suministrados por la bomba durante el ensayo de calentamiento.

Hora	Irradiación (W/m^2)	Caudal (L/min)
09:00	57	0,1
09:30	104	0,2
10:00	197	0,3
10:30	450	0,3
11:00	501	0,5
11:30	607	0,86
12:00	708	0,9
12:30	725	1
13:00	775	1,2
13:30	780	1,2
14:00	732	1,1
14:30	775	1,2
15:00	733	1
15:30	670	0,11
16:00	236	0,3
16:30	162	0,2
17:00	60	0,1

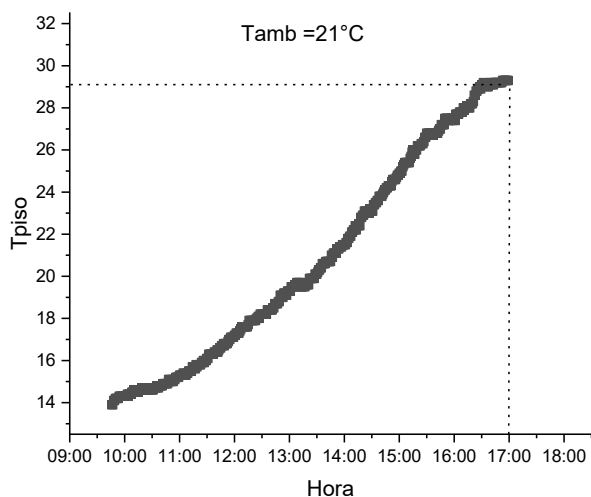


Figura 11. Evolución de la temperatura del piso prototipo en una jornada solar de invierno.

Ensayo de enfriamiento del piso radiante

La Fig. 12 muestra la variación nocturna de temperatura de piso expuesto en un ambiente cuya temperatura varió entre 25 y 20°C. A las 8 de la mañana la temperatura registrada en el piso fue de 23°C.

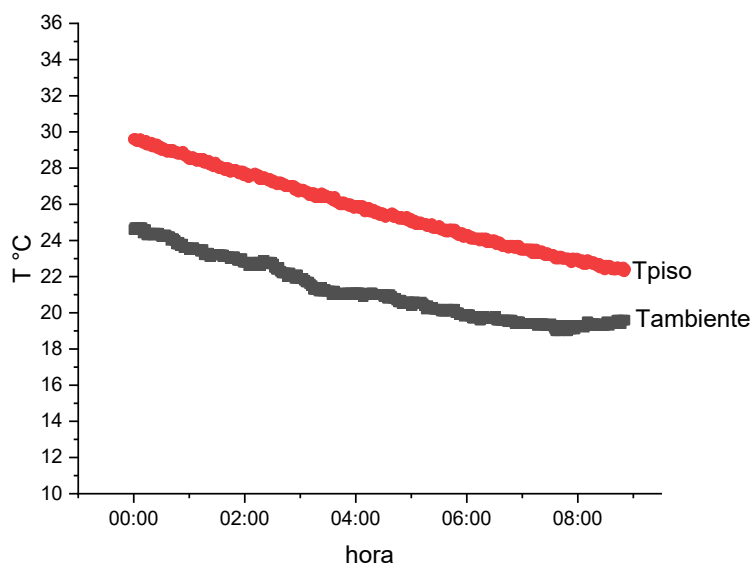


Figura 12. Enfriamiento nocturno del piso.

Una reflexión: observando la Fig. 12, en cuanto a la temperatura final del piso luego del enfriamiento nocturno ($T = 23^{\circ}\text{C}$ en este ensayo), en una situación real este valor dependerá de las condiciones ambientales en la que se encuentre. Entonces, valores muy elevados de temperatura del piso al arranque de la jornada podría ocasionar la posibilidad de sobrecalentamiento durante el día. A raíz de ello, estamos evaluando el diseño de una automatización de bajo costo que actúe durante el día y así mantener las condiciones higrotérmicas requeridas. La estrategia se basa en un monitoreo de temperatura del piso asociado a un sistema que pueda derivar el flujo de agua caliente de los colectores hacia otra aplicación, como por ejemplo la obtención de agua caliente sanitaria para vivienda

CONCLUSIONES DE LOS PRIMEROS AVANCES

En cuanto al sistema de recirculación:

El sistema implementado basado en la recirculación autónoma mediante la dupla bomba - panel fotovoltaico de baja potencia (en estos ensayos de 2 y 5 W respectivamente) es económica, muy sencilla y eficiente. Al no requerirse ningún tipo de aporte de energía de red hace que esta idea sea 100% sustentable. De implementarse en un piso radiante para una habitación de unos 10 m² se requerirá una bomba de recirculación de aproximadamente 5W ya que tendrá que hacer recircular agua a través de 100 m de espiral de manguera de ¾“.

En cuanto al colector solar utilizado:

los ensayos térmicos indicaron que con la aplicación de colectores solares auto construidos de eficiencias aceptables del orden del 38%, se requiere una relación de áreas de colector y de piso radiante de $A_c/A_p \approx 0,5$. Con esta relación se puede satisfacer la demanda térmica del piso en invierno para cumplir el requisito de confort establecido de 18°C a 29 °C.

En cuanto a la proporción de la masa de agua encapsulada

la incorporación de agua encapsulada al hormigón del piso radiante en una proporción del 33% en volumen, por el incremento de la masa térmica, otorga al piso la posibilidad de acumular un 40% más de calor, en comparación de uno similar 100% hormigón. Con la experiencia y los resultados térmicos obtenidos con el prototipo, se prevé hacer otro con una mayor relación (50%), que dará mayor inercia térmica, pero primero se evaluará si ésta proporción compromete la resistencia mecánica del piso.

En cuanto al comportamiento térmico del prototipo:

de los ensayos térmicos realizados se concluye que la incorporación de agua encapsulada en el piso radiante en una relación del 33 % en volumen, genera menos riesgo de sobre calentamiento si se lo compara con uno similar, pero 100% de hormigón. Dicha incorporación permite acumular más energía para entregar a la habitación durante la noche. En los ensayos se observó que el piso al culminar la jornada solar de invierno, en un ambiente cuya temperatura ronda los 21°C, llega a temperaturas cercanas a los 29°C. En cuanto al enfriamiento nocturno se observó que en un ambiente cuya temperatura varió de 25 a 20°C, a las 08:00 hs la temperatura registrada en el piso fue de 23°C.

Trabajo a futuro:

Se prevé realizar un piso prototipo a escala con mayor cantidad de agua encapsulada (50%), de los resultados de los ensayos se decidirá la proporción a utilizar para la elaboración un piso radiante, del tipo propuesto en este trabajo, en una habitación de 8 m². En este caso, para la recirculación del agua caliente será necesaria la aplicación de 100 m de manguera empotrada en el piso, y la utilización de 4 m² de colector de bajo costo. Se utilizará una bomba de 5 W y un panel fotovoltaico de 10 W. Para evitar un posible sobrecalentamiento del piso durante el día, se evaluará la posibilidad de incorporar un sistema de bajo costo que permita derivar el excedente de calor, generado por el colector, hacia un tanque aislado, para poder además contar con agua caliente sanitaria.

REFERENCIAS

- ANSI/ASHRAE Standard 55, (2004). Thermal Environment Conditions for Human Occupancy.
- Bilgen E., Richard M. A. (2002). Horizontal Concrete Slabs as Passive Solar Collectors. Solar Energy 72, 5, pp. 405–413.
- Turner J., Fichter R. (1972). Libertad para construir. México, D. F.: Siglo XXI.
- Liua L. Hammamia N., Trovaleta L., Bigota D., Habasb J., Malet-Damoura B. (2022). Description of phase change materials (PCMs) used in buildings under various climates: A review. Journal of Energy Storage 56.
- Klepeis N. E, Nelson W. C., Ott W., Robinson J. P.. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 11(3):231-52.

- Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.
- Laffón Blasco B., Fernández J. M., Valdés C., Viñas Arrebola (2007). Cálculo de índices de confort térmico en recintos cerrados con transferencia de calor. I Jornada Nacional de Investigación en Edificación. Universidad Politécnica de Madrid 2007. https://oa.upm.es/3676/2/LAFFON_PON_2007_01.pdf.
- Meijie Wang, Papan Li, Weijie Liu, (2022). Generic mathematical formulation of the total heat transfer coefficients between heated radiant floor surfaces and rooms Building and Environment, Volume 211, 1 March 2022, 108701.
- Orosa JA. (2009). Research on general thermal comfort models. European Journal of Scientific Research; 27(2):217–27. 1450-216X.
- Viegas G.M., Jodraa J.I., San Juana G.A., Díscoli C. A.. Heat storage wall made of concrete and encapsulated water applied to mass construction social housing in temperate climates. Energy and Buildings. Volume 159, 15 January 2018, Pages 346-356.
- Woodson r. D. (1999). Complete construction, radiant floor heating McGraw-Hill Publishing. ISBN 007134786-0.

CONCRETE RADIANT FLOOR WITH ENCAPSULATED WATER AND AUTONOMOUS RECIRCULATION, FIRST PROGRESS.

ABSTRACT: Advances in the development of a new radiant floor heating system are presented. It is based on a concrete floor that has water encapsulated in plastic bottles inside. The heating of the floor is done through the circulation of hot water through a PEBD hose spiral that is also embedded in the concrete. The concrete and the encapsulated water make up a thermal mass of accumulation by sensible heat. This radiant floor was designed to operate totally autonomous from the network (gas or electricity), the heating of water is through solar collectors, the impulsion of the recirculating water is for a pump energized by a photovoltaic panel of very few Watts. Conforming a simple and economical automated system. To evaluate the feasibility of the idea, a prototype floor with a smaller area of 1 m x 1 m x 0,15 m was assembled. Using a ratio of volumes of encapsulated water and concrete $V_a/V_H = 0.33$. As a basic design feature, it was sought that in winter the floor surface be maintained in the hygrothermal range of 18°C to 29°C. This could be achieved by using a ratio of approximately 0,5 m² of solar collection surface /m² of floor heating.

Keywords: radiant floor, recirculated, photovoltaic.

ARBOLADO EN UN ESPACIO VERDE PÚBLICO DE YERBA BUENA, TUCUMÁN. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.

Marta S. Cisterna¹, Luciano M. Garbero¹, Fernando Martínez¹

¹ Centro de Estudios Energía, Habitabilidad y Arquitectura Sustentable (CEEHAS). Instituto de Acondicionamiento Ambiental (IAA). Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional de Tucumán. Av. Roca 1900, S.M. de Tucumán, CP 4000, Tucumán. www.ceehas.org.ar.

Tel. (54) (381) 4364093, interno 114.

E mail mcisterna@herrera.unt.edu.ar - lmgarbero@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: Se presenta una metodología cualicuantitativa para el análisis del arbolado en espacios verdes públicos. Se ha seleccionado como caso de estudio la Plaza Nogués, ubicada en el Municipio de Yerba Buena, Tucumán. El objetivo es proponer una herramienta de análisis que permita caracterizar la calidad de espacios verdes urbanos, relacionada principalmente con el estado de su arbolado, su valor paisajístico y las mejoras ambientales que provee. Se plantea la determinación de dos índices de valoración: el Índice Volumétrico de Vegetación Ambientalmente Activa (IVVA [m^3/m^2]), y el Índice Ambiental Urbanístico (IAU). El análisis realizado permitió cuantificar la importancia de la vegetación desde el punto de vista urbanístico-ambiental, y también cualificar el valor paisajístico. Los resultados muestran que la Plaza Nogués presenta un valor ambiental medio, considerado bueno. Desde el punto de vista urbanístico, en función de las características de su arbolado, se considera un lugar atractivo, con valor cultural, histórico y paisajístico. El análisis permite avanzar hacia una planificación sostenible, con la inclusión de estrategias para mejorar la calidad y el mantenimiento. La metodología propuesta se considera un aporte para el estudio de los espacios verdes urbanos.

Palabras Clave: arbolado urbano, condiciones ambientales, valor paisajístico.

INTRODUCCIÓN

Importancia de los espacios verdes públicos.

Los espacios verdes públicos, con su arbolado, forman parte del patrimonio biológico, histórico, social y cultural de una ciudad, constituyen un legado generacional y contribuyen a la satisfacción de las necesidades recreativas y ambientales de la sociedad (Ledesma, 2008). El arbolado ejerce efectos positivos sobre la estética y las condiciones ambientales de la ciudad: regula las temperaturas, provee sombra, constituye el hábitat de aves e insectos que forman parte de la biodiversidad urbana, es refugio de flora y fauna, cuida la polinización, atenúa y filtra los vientos, también colabora en la reducción de ruidos urbanos (Mora-Olivo y Martínez, 2012; Calquín et al., 2019). Permite infiltrar agua en el suelo y la recarga de acuíferos, atenúa la luminosidad y purifica la atmósfera por la captación de partículas de polvo y contaminantes (Berland et al., 2017). A través de la fotosíntesis, contribuye a disminuir los efectos de la contaminación del aire, en particular el CO₂ (Gülçin y van den Bosch, 2021), mientras que por la transpiración liberan agua a la atmósfera en forma de vapor que modifica el microclima de las ciudades (Erlwein et al., 2021).

Además, la importancia de los espacios verdes públicos surge de su rol como elemento estructurador del paisaje urbano, contribuyendo así con la organización espacial de la ciudad, su definición perceptual y la identidad urbana (Birche, 2019). Dependiendo de su magnitud y composición, las plazas, parques y jardines urbanos aportan valor estético e identidad a las ciudades, las hace más agradable para vivir, al mismo tiempo, aportan valor perceptual paisajístico, influyendo notoriamente sobre las condiciones

ambientales, y, por consiguiente, mejoran la calidad de vida urbana. Además, brindan servicios sociales al favorecer la recreación, el juego, el esparcimiento y la integración social.

Con el avance de la urbanización y la densificación de las ciudades, la necesidad de contar con espacios verdes que cumplan la función de ser mejoradores ambientales y paisajísticos, adquiere mayor importancia. Surge así interés por analizar la calidad de los parques y plazas, en este caso relacionado con el valor paisajístico y el volumen vegetativo que presentan, sus características, estado y mantenimiento (Cisterna et al., 2021). En la actualidad, existen diversos protocolos y metodologías que se pueden aplicar para determinar la calidad de parques y plazas, considerando la vegetación y cuantificando la cantidad de estratos presentes para asignar, en base a ello, un puntaje (INE CHILE 2019). Otra metodología, de carácter descriptivo, consiste en la cuantificación de especies arbóreas, acompañada con registro fotográfico para la identificación de los especímenes. Conjuntamente al registro se elaboran planos de ubicación y perfiles de los especímenes (Aguilar Frías, 2022).

Investigaciones sobre espacios verdes sostienen que las áreas naturales contribuyen a mejorar la calidad de vida de los habitantes urbanos, impactando positivamente en la satisfacción y en el bienestar auto percibido. Según los estudios, el uso de espacios verdes se relaciona significativamente con el estado de salud percibido: las personas que usan con frecuencia las plazas y los parques de las ciudades analizadas, reportan tener mejor salud que aquellos que no lo hacen (Godben et al., 1992; Chiesura, 2003; Gómez y Parente, 2018; Chang et al., 2020). Las características naturales de las ciudades pueden ofrecer también beneficios sociales. Kaźmierczak (2013) plantea en su investigación que la naturaleza fomenta el uso de espacios al aire libre, aumenta la integración social y la interacción entre vecinos. Concluye que los espacios verdes favorecen el desarrollo de valores sociales y culturales, y ofrecen lugares de encuentro que promueven el sentido de comunidad a través de vínculos emocionales con el vecindario.

Con el objetivo de incrementar la presencia de área verde y arbolado en las ciudades, se propone el manejo de criterios cuantitativos y cualitativos que ayuden a los profesionales en el manejo de elementos representativos de la naturaleza, tanto para la protección de los ejemplares existentes, como para la mitigación de efectos ambientales adversos (Codina y Barón, 2003).

Caso de estudio: Plaza Nougés, Yerba Buena, Tucumán.

El presente estudio se realiza en el marco del proyecto de investigación PIUNT B706: “Diseño del Espacio Público Urbano y Confort Ambiental en el Área Metropolitana de Tucumán”, actualmente en desarrollo. Se ha propuesto como objetivo evaluar las condiciones ambientales que presentan espacios públicos urbanos en el Área Metropolitana de Tucumán (AMeT), a través de una metodología que permita determinar las condiciones físico-ambientales y la valoración, según las expresiones de los habitantes de la ciudad. En esta oportunidad se presenta una metodología cuantitativa para el análisis del arbolado, aplicada en un caso de estudio.

Se propone para el estudio la Plaza Nougés, ubicada en el Municipio de Yerba Buena, al oeste de la ciudad capital San Miguel de Tucumán. Yerba Buena es una de las Localidades que presenta mayor desarrollo en los últimos veinte años. Su población muestra un incremento del 35,7% respecto del año 2010 - el segundo más alto de la provincia-, según el INDEC 2022. Desde sus orígenes en 1898, con el establecimiento de las primeras viviendas rurales unifamiliares sobre la Avenida Aconquija, en 1906, el Municipio de Yerba Buena presenta un paisaje urbano de suburbio jardín o “ciudad jardín”, con predominio en el uso del suelo de la vivienda unifamiliar con jardines. El interés primordial que movió a los primeros habitantes, fue la de buscar los beneficios de la vida del campo, con un mayor contacto con el verde de la naturaleza, muy en consonancia con las ideas “higienistas” de la época. Este deseo de promover prácticas urbanas consonantes con los preceptos de las corrientes higienistas en la búsqueda de mejorar la calidad de vida de sus residentes, representa un objetivo fundamental que favorece el carácter de ciudad verde, que conserva hasta el presente (Ferrari 2017). Esta característica de ciudad jardín nos ha motivado a seleccionarla para realizar el estudio, con el fin de cuantificar y cualificar la calidad de una de sus plazas más importantes. En el entorno de la plaza, se encuentra la Parroquia Nuestra Señora del Valle, edificio de importante valor histórico para la comunidad (Fig.1).

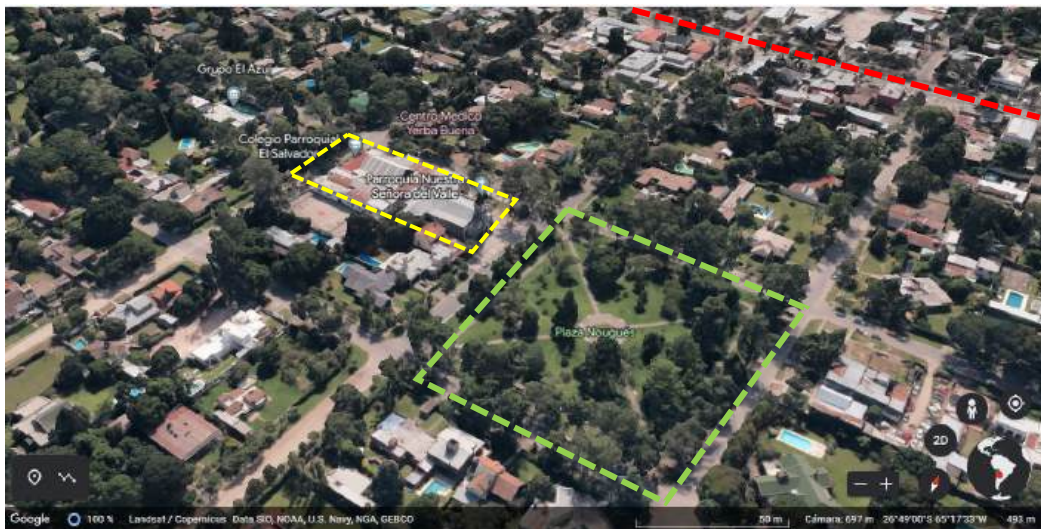


Figura 1: Imagen satelital de la Plaza Nougues y su entorno, la Parroquia Ntra. Señora del Valle, y también la Av. Aconquija, principal vía circulación. Fuente Google Earth.

METODOLOGÍA PROPUESTA. Índice Volumétrico de Vegetación Ambientalmente Activa

Para realizar el análisis de la plaza, se propone el Índice Volumétrico de Vegetación Ambientalmente Activa (IVVA m^3/m^2), y el Índice Ambiental Urbanístico (IAU) desarrollados por los ingenieros Ramón Codina y Jorge Barón, de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo de Mendoza, Argentina. El análisis permite avanzar en la definición de metodologías para la evaluación de las condiciones ambientales de espacios verdes urbanos.

Con el objetivo de cuantificar la importancia de la vegetación, se propone una metodología basada en el volumen vegetativo presente en un espacio verde urbano (Codina y Barón, 2003). El Índice Volumétrico de Vegetación Ambientalmente Activa y el Índice Ambiental Urbanístico integran aspectos cuantitativos y cualitativos, ambos permiten cuantificar la importancia urbanística y ambiental de la vegetación y también cualificar su valor paisajístico. La metodología propuesta introduce criterios para la valoración cuantitativa de los espacios verdes existentes y permite estimar la necesidad de espacios verdes en asentamientos urbanísticos, fundamentado en la influencia de la vegetación como mejorador ambiental de factores micro climáticos, contaminantes y paisajísticos. El IVVA indica, en volumen, la cantidad de vegetación ambientalmente activa, por unidad de superficie de terreno afectado y del espacio ocupado por la vegetación. Superficie verde efectiva es la superficie que porta la vegetación. Para el cálculo del IVVA intervienen los siguientes parámetros:

- Persistencia del follaje
- Textura del follaje
- Densidad del follaje
- Esperanza de vida de cada especie vegetal
- Renovación sistemática.

Índice Ambiental Urbanístico (IAU)

Desde el punto de vista urbanístico, es necesario incorporar otros parámetros de juicio valorativo, ya que todo elemento vegetal reviste valores especiales según el lugar donde se encuentra. También se debe considerar el efecto paisajístico, un criterio decisivo para la valoración del hábitat humano. Entornos paisajísticamente agradables o con adecuada vegetación aumentan incluso el valor económico de las propiedades. Por lo tanto, la vegetación debe ser analizada desde dos puntos de vista: la utilidad funcional y la calidad estética. En ambos casos existe la posibilidad de valorar los elementos vegetales de manera alta o baja. Un árbol puede cumplir una función ambiental por su elevado IVVA, pero estar ubicado en un lugar inadecuado. Entonces, por ejemplo, brindará sombra en el periodo invernal, cuando se requiere asoleamiento (déficit de utilidad funcional) o constituirá un factor de riesgo; por tales razones, su valor disminuirá.

Es necesario tener en cuenta valoraciones de los elementos vegetales existentes desde otros dos puntos de vista: el ecológico y el cultural. Ecológicamente la vegetación, además de las funciones señaladas, aumenta la biodiversidad, tópico importante en los conglomerados urbanos, constituyen el hábitat de especies animales que -de otra manera- tienden a desaparecer, como las aves. Culturalmente, la presencia vegetal junto al hombre puede representar un hito histórico y una referencia educativa, independientemente de los valores científicos y de aplicación de las especies. El Índice Ambiental Urbanístico (IAU) propone elementos valorativos cuantificables integrados en una ecuación de cálculo y se puede aplicar para categorizar y evaluar espacios verdes existentes y posibilita comparar cuantitativamente el impacto ambiental de espacios verdes; de proyectos, de relevamientos, entre otros.

El valor ambiental-urbanístico de un espacio verde existente depende de:

- El IVVA, como valor básico.
- La ubicación respecto del conglomerado urbanizado.
- Su ponderación paisajística, ecológica y cultural.

Tabla 1: Resumen de factores que se consideran para el cálculo del IVVA.

Índice de Volumétrico de Vegetación Activa (IVVA)	
FACTORES	Descripción
Persistencia del follaje (FP)	De 0,1 a 1 según período anual (fracción anual en meses) en que la especie, en el lugar, permanece con hojas.
Textura del follaje (FT)	Especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, se consideran 5 categorías según la textura de su follaje: muy fina, fina, media gruesa, muy gruesa.
Densidad del follaje (FD)	Importante en la determinación de la influencia ambiental de las especies. Se propone un concepto cuantitativo de valoración, basado en la intercepción lumínica producida por el follaje. Para su determinación se realizan mediciones con luxómetro, debajo de copa, con la influencia de su sombra, y en un sector con el total de luz natural, sin obstrucciones.
Estado fisiológico y sanitario (FE)	Se pondera globalmente el estado fisiológico, nutricional y sanitario del vegetal, considerando la incidencia de factores adversos: enfermedades y plagas, y su grado de recuperabilidad, posibles tratamientos adecuados.
Esperanza de vida (FEV)	El efecto ambiental de un elemento vegetal está condicionado por la duración en el tiempo, siempre será deseable que los componentes volumétricos básicos del paisaje - árboles y arbustos- posean condiciones de adecuada durabilidad o esperanza de vida. Esto también se relaciona con la sustentabilidad de los espacios.
Índice Ambiental Urbanístico (IAU)	
FACTORES	Descripción
De Ubicación Urbana (Fu)	Depende de la relación entre distancia respecto del conglomerado urbanizado y el N° de habitantes
Paisajístico, Ecológico y Cultural (Fp)	<p>Valora al espacio verde, grupo vegetal o ejemplar aislado considerado, según su aptitud para mejorar el paisaje, basado en criterios funcionales, estéticos, valores culturales y/o ecológicos.</p> <p>Funcionalidad: aptitud de la vegetación para cumplir la función requerida por el usuario: sombra o asoleamiento, protección, delimitación, mejoramiento micro climático, etc. También incluye el riesgo de caída, ubicación inadecuada.</p> <p>Calidad visual: analiza la belleza escénica que sugiere el vegetal o su conjunto, valorando la capacidad de acogida del espacio circundante o como elemento estético en sí mismo, según el grado de captación del interés en su contemplación por parte del usuario.</p> <p>Naturalidad y valores ecológicos y culturales: El grado de naturalidad del paisaje se califica según el aspecto de natural, ya sea vegetación de origen espontáneo (autóctona) o cultivada (diseño paisajístico). Se otorga mayor puntaje a la distribución de vegetación según lineamientos naturales.</p> <p>El valor ecológico depende de la integración de los elementos vegetales con los medios biótico y abiótico, y la rareza de las especies presentes (endemismos, especies únicas, etc.); su utilidad para otras formas de vida (especies colonizadoras); su capacidad de adaptación a condiciones difíciles del sitio (resistencia a sequía o a la contaminación), etc.</p> <p>El valor cultural se vincula con la connotación histórica o conmemorativa que se asigne a la vegetación estudiada o el valor científico (plantas madres o semilleras, especies raras, etc).</p>

Relevamiento de la plaza

Se realizaron visitas de campo a la plaza para llevar a cabo relevamientos fotográficos, mediciones de sonido, de niveles de luz natural y relevamiento de especies vegetales. También se llevaron a cabo entrevistas a las personas que se encontraban allí realizando diversas actividades. Los datos forman parte de los estudios que se desarrollan en la investigación propuesta.

En los relevamientos, se pudo constatar la presencia de 189 árboles de diversas especies, siendo las de mayor número –y por lo tanto, más representativas– el lapacho (*Handroanthus impetiginosus* y *ochraceus*), le siguen el crespón (*Lagerstroemia indica*) y la grevillea (*Grevillea robusta*), representado el 60% del arbolado, aproximadamente.

Consideraciones sobre el arbolado de la plaza.

- Asimilando las especies de mayor presencia al total de árboles de la plaza, tenemos: 104 lapachos, 45 crespones y 40 grevilleas (Figs. 2, 3, 4 y 5)
- A partir de los relevamientos y considerando las especies representativas, el IAU en la plaza se encuentra en el rango medio, entre 1 y 10.
- El volumen estimado de vegetación activa es: 27,5 m³/m²
- En la superficie total de la plaza tenemos un volumen de vegetación activa IVVA total: 277.750 m³



Figuras 2, 3 y 4: Fotografías del arbolado de la plaza, compuesto por Lapacho, Crespón y Greviela, Fuente: Autor (29/07/2023).

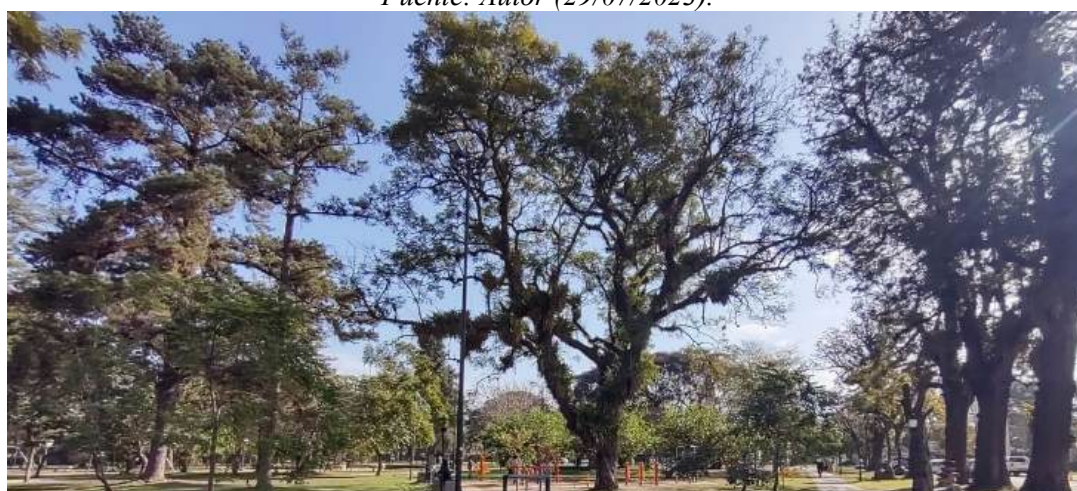


Figura 5: Imagen de la plaza donde se observa el estado del arbolado en época invernal. Fuente: Autor (29/07/2023).

A partir de los datos obtenidos, se pudo realizar el cálculo de los Índices Volumétrico de Vegetación Activa (IVVA) y Ambiental Urbanístico (IAU) de la Plaza Nogués, Yerba Buena, Tucumán (Tabla 2).

Tabla 2: Cálculo del IVVA y del IAU de la Plaza Nougués de Yerba Buena, Tucumán.

		Ejemplar 1	Ejemplar 2	Ejemplar 3	
Nombre vulgar		Grevillea	Lapachos: rosado / amarillo	Crespón	
Nombre científico (género y especie)		<i>Grevilea robusta</i>	<i>Handroanthus impetiginosus / ochraceus</i>	<i>Lagerstroemia indica</i>	
INDICE DE VEGETACIÓN ACTIVA (IVVA)	DIMENSIONES	Diámetro (D) [m]	20,00	8,00	7,50
		Altura total (ht) [m]	30,00	15,00	6,00
		Altura de copa (hc) [m]	22,00	7,00	5,00
		Ancho medio del elemento foliar (am) [mm]	15,00	30,00	25,00
		Forma de copa (fc)	Cilíndrica	Casquete esférico	Casquete esférico
		Volumen vegetal (VV) [m ³]	6911,50	256,56	163,62
	FACTORES	Factor Persistencia del Follaje (FP) [n°]	1,00	0,50	0,25
		Factor Textura del Follaje (FT) [n°]	0,50	0,50	0,50
		Luz Directa (LD) [Lux]	52000,00	52000,00	52000,00
		Luz Transmitida por la Copa (LC) [Lux]	10000,00	24000,00	17000,00
		Coficiente de Intercepción Lumínica (CIL) [coef.]	0,81	0,54	0,67
		Factor Densidad del Follaje (FD) [n°]	0,10	0,10	0,10
		Factor Estado Fisiológico y Sanitario (FE) [n°]	0,60	0,80	0,60
		Factor Esperanza de Vida (FEV) [n°]	1,00	0,80	0,30
		Volumen de Vegetación Activa (VVA) [m ³]	207,35	4,11	0,37
		Superficie Verde Efectiva (SVE) [m ²]	400,00	64,00	56,25
Índice Volumétrico de Vegetación Activa (IVVA) [m ³ /m ²]	0,52	0,06	0,01		
ÍNDICE AMBIENTAL URBANÍSTICO (IAU)	FACTOR DE UBICACIÓN URBANA (FU)	Número de Habitantes (N° Hab.) [n°]	101874,00	101874,00	101874,00
		Factor de Población (P) [coef.]	8,00	8,00	8,00
		Distancia a Centro Urbano (Dist.) [Km]	0 a 0,15	0 a 0,15	0 a 0,15
		Factor de Distancia (d) [coef.]	1,00	1,00	1,00
		Factor de Ubicación Urbana (FU) [coef.]	8,00	8,00	8,00
	FACTOR PAISAJÍSTICO, ECOLÓGICO Y CULTURAL (Fp)	Funcionalidad (f) [coef.]	6,50	6,50	6,50
		Riesgo (r) [coef.]	6,50	6,50	6,50
		Funcionalidad Total (fT) [coef.]	6,50	6,50	6,50
		Calidad Visual (cv) [coef.]	6,00	6,00	4,00
		Naturalidad (n) [coef.]	6,00	7,00	4,00
		Valor Ecológico (ve) [coef.]	6,00	6,00	4,00
		Valor Cultural Científico (vcc) [coef.]	4,00	7,00	5,00
		Naturalidad y Valores Ecológicos y Culturales (NVEC) [coef.]	5,33	6,67	4,33
Factor Paisajístico, Ecológico y Cultural (Fp) [coef.]	5,94	6,39	4,94		
IAU	Índice Ambiental Urbanístico (IAU) [coef.]	24,65	3,28	0,26	

RESULTADOS DEL ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE VEGETACIÓN ACTIVA (IVVA) Y DEL ÍNDICE AMBIENTAL URBANÍSTICO (IAU)

La escala de referencia del Índice Ambiental Urbanístico IAU para el valor ambiental-volumétrico de la vegetación IVVA evaluada en condiciones reales, considera tres rangos: alto, medio y bajo. Dada la complejidad de los criterios y tratándose de elementos dinámicos -en permanente crecimiento- con el agregado de valoraciones subjetivas, estéticas y ecológicas que varían con el tiempo y según aspectos culturales y sociales, se han establecido rangos, con un valor mínimo: 0, y un valor máximo indefinido. A partir de determinaciones experimentales, se han propuesto los valores bajos, medios y altos alcanzables -en condiciones normales- para especies comunes. La escala de referencia propuesta para ámbitos urbanos y rurales, es:

IAU: bajo (malo) = 0 a 1 medio (bueno)= 1 a 10 alto (excelente) = > 10

CARACTERIZACIÓN DEL ARBOLADO

La diversidad se determinó con el Índice de diversidad de Shannon (H') el cual se basa en la riqueza proporcional de especies, generalmente oscila con valores entre 1,5 y 4,5. Cuanto más elevado es el valor de este índice, mayor es la diversidad de la comunidad (Magurran, 1988). Se calcula con la siguiente expresión:

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

Donde:

S = es el total de especies

p_i = proporción de individuos hallados en la i -ésima especie, se estima como

$$n_i/N$$

Donde:

n_i = número de individuos de cada especie

N = número total de especies

En la plaza se registraron 19 especies de árboles, incluidos 1 especie de palmera y ligustro disciplinado. Aplicando la fórmula de Shannon (H'), se determinó un valor de diversidad $H'=1,5$ que corresponde a una situación de diversidad baja.

Considerando las especies de mayor presencia, el arbolado de la plaza se puede definir como integrado, principalmente, por árboles de porte mediano y alto, con alturas que oscilan entre 15 y 30 metros, combinados, en menor proporción, con árboles bajos de altura $h=6$ m. Un importante factor a considerar es el desarrollo foliar, por su relación con las capacidades que tienen los árboles de brindar servicios ambientales tales como reducción del ruido, mejorar la calidad del aire, interceptar el agua de lluvia, captar las partículas contaminantes de la atmósfera, moderar la temperatura, proteger de la radiación, entre otras (Conway y Bourne, 2013). En la plaza, la mayoría de los árboles son caducifolios, o de hojas caducas, la textura foliar que prevalece es media, con anchos de hojas entre 5 a 100 milímetros. La densidad del follaje, ha sido evaluada cuantitativamente en base a la intercepción lumínica producida. Para ello, se registraron los niveles de luz debajo de la copa, en la superficie protegida, y, simultáneamente, en una superficie adyacente, sin la obstrucción de la copa. Se determinaron los Coeficientes de Intercepción Lumínica CIL, entre 0.8 y 0.5, en base a ellos, el Factor de Densidad del Follaje de 0.1, el cual indica una densidad de follaje muy baja (Tabla 3). Esto se debe principalmente a la época del año en que se realizó el relevamiento (invierno) y también se relaciona con la pérdida del follaje de la mayoría de las especies arbóreas presentes en la plaza.

$$CIL = (LD - LC) / LD$$

Donde:

CIL = coeficiente intercepción lumínica

LD = luz directa

LC = luz transmitida por la copa

Tabla 3: Escala para determinar la densidad del follaje según los coeficientes CIL y FD

CIL	Densidad del follaje	FD
0.960 a 0.999	muy alta	1
0.920 a 0.959	alta	0.8
0.880 a 0.919	media	0.5
0.840 a 0.879	baja	0.3
0.800 a 0.839	muy baja	0.1

Otro aspecto importante es el estado fisiológico y sanitario del arbolado (FE), el cual se considera entre bueno y medianamente bueno (Tabla 4). Los árboles de la plaza, en general se encuentra en buen estado, no se observa la incidencia de plagas ni de enfermedades de forma generalizada; como un aspecto negativo, sólo se registraron algunos individuos que evidencian poda inadecuada y con algunas heridas. Sobre la durabilidad del arbolado, la mayoría de las especies presentan esperanza de vida (FEV) entre 50 y 100 y más de 100 años, impactando de forma positiva en la sustentabilidad de la plaza (Tabla 5).

Tabla 4: Factor Estado fisiológico y sanitario (FE)

Categoría del ejemplar	FE
muerto	0
muy deteriorado	0.1
débil, recuperable	0.3
mediano	0.6
bueno	0.8
óptimo	1

Tabla 5: Factor Esperanza de vida (FEV)

Esperanza de vida (años)	FEV
>100	1
50 a 100	0.8
30 a 50	0.5
10 a 30	0.3
<10	0.1

Índice Ambiental Urbanístico

El valor ambiental-urbanístico depende, además del IVVA como valor básico, de dos variables principales: la ubicación respecto del conglomerado urbanizado y su ponderación paisajística, ecológica y cultural. Para analizar la ubicación respecto del conglomerado urbanizado se aplicó un Factor de Ubicación Urbana (Fu) que depende la población y la distancia:

$$P/d$$

Donde:

P = Factor según la población del conglomerado
 d = distancia

Los factores P y d se encuentran según la siguiente escala (Tabla 6):

Tabla 6: Factor P , según número de habitantes y distancia d .

Nº de habitantes	P	Distancia (KM)	d
1 – 1000	1	0 – 1	1
1.000 – 2.000	2	1 – 2	2
2.000 – 4.000	3	2 – 4	3
4.000 – 8.000	4	4 – 6	4
8.000 – 16.000	5	6 – 8	5
16.000 – 50.000	6	8 – 10	6
50.000 – 100.000	7	10 – 15	7
100.000 – 500.000	8	15 – 25	8
500.000 – 1.000.000	9	25 – 50	9
>1.000.000	10	>50	10

La ponderación paisajística, ecológica y cultural se determinó con el factor (F_p) que valora la aptitud para mejorar el paisaje, basado en criterios funcionales, estéticos, valores culturales y ecológicos. La funcionalidad considera la capacidad de la vegetación para cubrir requerimientos de los usuarios, en correspondencia con la existencia de una situación de riesgo para las personas y sus actividades, motivada por las características de la especie vegetal. La escala de clasificación y el rango de puntaje asignado a la funcionalidad (f) es la siguiente (Tabla 7):

Tabla 7: Factor *f*, según funcionalidad y riesgo

Funcionalidad	Riesgo	f
alta	nulo	6 a 7
media	levemente posible	3 a 6
baja a nula	posible a alto	0 a 3

La utilidad funcional del arbolado se considera alta, debido principalmente al buen estado sanitario que presentan, además de su ubicación adecuada para las actividades que se realizan en la plaza, permitiendo la reunión de grupos de personas, la circulación en bicicletas, rollers, sector de juegos infantiles de destreza física y también didácticos (dibujo, pintura), y sectores de reposo – relajación (Figs. 6 y 7).



Figura 6: Zona de juegos integrada con el arbolado. Fuente: Autor (24/07/2023).



Figura 7: Pista de gimnasia integrada con el arbolado. Fuente: Autor (29/07/2023).

La calidad visual analiza la estética del espacio verde en función del grado de interés despertado en el usuario, para su contemplación. La escala aplicada se muestra en la Tabla 8:

Tabla 8: Factor *c* según escala de calidad visual

Concepto estético	Valor c
muy vistoso	7
atractivo	6
distinguido	5
agradable	4
vulgar	3
neutro	2
desagradable	1

En relación a la calidad visual y paisajística que brinda el arbolado en su conjunto, se considera atractiva y se valora positivamente la imagen estética interesante, armoniosa, con variedad equilibrada.

El grado de naturalidad del paisaje vegetal se evaluó según el aspecto y distribución de la vegetación. También se analizó el valor ecológico, que depende de la integración y capacidad de adaptación de las especies vegetales a las condiciones del sitio. El valor cultural se definió según la connotación histórica o conmemorativa asignada a la vegetación de la plaza, (Tabla 9)

Tabla 9: Factor *n*, según naturalidad, valor ecológico y cultural.

Naturalidad	Valor ecológico	Valor cultural	n
alta	alto	alto	5 a 7
modificada	medio	medio	3 a 5
muy modificada	bajo	bajo	1 a 3

La evaluación de naturalidad según el aspecto del paisaje vegetal, considera un alto grado de condición natural, ya que la vegetación de la plaza, en su mayoría es autóctona, con crecimiento natural, y distribuida según lineamientos naturales. El valor ecológico del arbolado se considera alto, teniendo en cuenta la buena integración de los elementos vegetales con los medios biótico y abiótico, la convivencia con variedad de aves e insectos. Asimismo, se considera un valor cultural alto en relación a las especies vegetales autóctonas, con connotación histórica y valor patrimonial. Es importante señalar que la Plaza Nougés forma parte del casco histórico del municipio, constituyendo un nodo de referencia en la zona, con características paisajísticas reconocibles y valoradas positivamente por los habitantes.

Valoración de los usuarios

Como un aporte que complementa la metodología de análisis propuesta, se plantea la inclusión de cuestionarios y entrevistas a los usuarios de los espacios verdes. A partir de los datos obtenidos es posible enunciar recomendaciones dirigidas a mejorar el diseño y la gestión de estos espacios. El objetivo es conocer la valoración que registran los usuarios sobre el arbolado -las características intrínsecas y extrínsecas- relacionadas con el diseño, el mantenimiento y la gestión de las plazas y parques urbanos. Se podrán conocer las opiniones sobre la calidad visual, el equipamiento, también sobre los servicios ecosistémicos sociales y culturales: enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexión, ocio y experiencias estéticas (Sanna y Eja, 2017); y en relación al arbolado y las condiciones ambientales que ofrecen: sombra, temperatura, calidad del aire y otros.

CONCLUSIONES

El análisis del arbolado de la Plaza Nougés de Yerba Buena aplicó la metodología descrita, y, en base a considerar los elementos vegetales, sus condiciones intrínsecas, densidad y forma del follaje, estado sanitario y longevidad, entre otros, se obtuvieron datos que permitieron conocer sus principales características formales y las condiciones ambientales que ofrecen. Según la escala establecida, se determinó el Índice Volumétrico de Vegetación Activa, el cual, para la plaza analizada, indica un valor ambiental medio, que corresponde a un valor ambiental bueno.

Desde el punto de vista urbanístico y en función de las características de su arbolado, la plaza se considera como un lugar atractivo, con valor paisajístico. La metodología considera para el análisis, parámetros de juicio valorativo relacionados con el lugar donde se encuentra la plaza y su arbolado, incluidos los efectos paisajísticos, ambientales y estéticos. Estos aspectos constituyen importantes criterios para la valoración del hábitat humano que pueden ser complementados con la opinión, las valoraciones y registros de usuarios de los espacios verdes.

La metodología cualicuantitativa para el análisis del arbolado en espacios verdes públicos, aplicada en la Plaza Nougés, del Municipio de Yerba Buena, Tucumán, permite realizar una evaluación a través de la valoración de las condiciones físicas-estructurales de los árboles, y también considerar aspectos visuales, paisajísticos, culturales y ecológicos. Su aplicación posibilita cuantificar la importancia ambiental y urbanística de la vegetación, constituyéndose en una herramienta para el análisis de espacios verdes urbanos y para el diseño de estrategias que mejoran la calidad y el mantenimiento de los mismos. Se considera importante avanzar en la caracterización de los espacios verdes públicos para mejorarlos y planificar su mantenimiento, reafirmar su carácter de nodos, de puntos nítidos en el paisaje urbano, caracterizados por su arbolado, por los edificios históricos que allí se encuentran y las actividades que se concentran a su alrededor.

REFERENCIAS

- Aguilar Frías, B. (2022). *Indicador áreas verdes: Diagnóstico del dosel vegetal en el boulevard Adolfo Ruiz Cortines en Poza Rica. UVserva*, (13), 31–43. Publicado 2022-04-25
<https://doi.org/10.25009/uvs.vi13.2858>
- Berland, A., Shiflett, S., Shuster, W., Garmestani, A., Goddard, H., Herrmann, D., Hopton, M. (2017). *El papel de los árboles en la gestión de las aguas pluviales urbanas*. Paisaje y Planificación Urbana, Vol. 162, Págs. 167-177, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>

Birche, M. (2019). El sistema de espacios públicos como factor estructurador de la calidad del paisaje y el ambiente urbano: el caso de la ciudad de La Plata. pdf. Doctor en Arquitectura y Urbanismo. Disponible en: <http://bdzalba.fau.unlp.edu.ar/greenstone/download/tesis/publico/doctorado/2019/TE98/BircheMarianaEvelyn.pdf>. Fecha de consulta: [11 de Agosto de 2023]

Calquín, F., Ponce-Donoso, M., Vallejos-Barra, O., Plaza, E. (2019). *Influencia del arbolado urbano sobre los niveles de ruido en una ciudad de Chile central*. Rev. FCA UNCUYO. Tomo 51. N°1. 2019. Págs. 41-53. Disponible en: <http://www.scielo.org.ar/pdf/refca/v51n1/v51n1a04.pdf>

Chang, C., Oh, R., Le Nghiem, T., Zhang, Y., Tan, C., Lin, B., Gaston, K., Fuller R., Carrasco L. (2020). Satisfacción con la vida vinculada a la diversidad de experiencias en la naturaleza y vistas de la naturaleza desde la ventana. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 202, octubre 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103874>

Cisterna M., Maristany, A., Gonzalo, G. (2021). “*Impacto del Paisaje Sonoro urbano desde el registro subjetivo de los usuarios. Abordaje Metodológico-Instrumental*”, publicado Revista Estoa. Vol. 10 Núm.20. Accesible en <https://doi.org/10.18537/est.v010.n020.a12>

Codina R. y Barón J. (2003). Criterio Ambiental Volumétrico para cálculo de Espacios Verdes. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XXXV. N°1. Año 2003. Pp. 11-24. Accesible en https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1877/codinaagrarias35-1.pdf

Erlwein, S., Zölch, T., Pauleit, S. (2021). *Regular el microclima con verde urbano en ciudades en densificación: Evaluación conjunta a dos escalas*. Edificación y Medio Ambiente. Vol. 205. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108233>

Ferrari, M. (2017). Suburbios seculares. La expansión en el Municipio de Yerba Buena (Tucumán 1898-1998). *Anales del IAA*, 47(1), 51-66. Consultado el (26/07/2023) en <http://www.iaa.fadu.uba.ar/ojs/index.php/anales/article/view/230/391>

Godben, G., Grafe, A., James, W. (1992). Los beneficios de los servicios locales de recreación y parques. Facultad de Salud y Desarrollo Humano, Pennsylvania. State University.

Gomes, P. y Parente, L., (2018). Sociabilidad pública en los parques urbanos de Río de Janeiro. En C. Egea y S. Coupleux (coords.), *Ciudad, vivir, habitar* (pp. 169-182). Granada, España: Universidad de Granada

Gülçin, D.; van den Bosch, C. (2021). Evaluación del almacenamiento de carbono sobre el suelo por parte de árboles urbanos utilizando datos LiDAR: el caso de un campus universitario. *Bosques* 2021, 12, 62. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/f12010062>

Kaźmierczak, A. (2013). La contribución de los parques locales a los vínculos sociales vecinales, *Paisaje y Urbanismo*, Vol. 109, Issue 1, 2013, Pages 31-44, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.05.007>

Ledesma, M. (2008). Arbolado público. Conceptos. Manejo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. INTA - EEA Manfredi, Córdoba. <http://ia802800.us.archive.org/13/items/ArboladoPublico-marcelaLedesma/LibroDef.pdf>

Magurran, A. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press. New Jersey. 179 p.

Mora-Olivo, A. y Martínez, J. (2012). Plantas silvestres del bosque urbano, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Ed. Dolores Quintanilla. Saltillo, Coah., México 139 p. https://www.academia.edu/6982116/Plantas_Silvestres_del_Bosque_Urbano_Cd_Victoria_Tamaulipas_M%C3%A9xico

Sanna, S. y Eja, P. (2017). Servicios ecosistémicos culturales y recreativos: ¿Cómo describe la gente su valor? *Servicios ecosistémicos*, 26(A), 1-9.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041617301742>

INDEC, Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE) CHILE (2019). Subdepartamento de Geografía, Indicadores de Calidad de Plazas y Parques Urbanos.

<https://storymaps.arcgis.com/stories/391dac6ee0c3438fbf186aed3ea1cff1>

URBAN FORESTRY IN A PUBLIC GREEN SPACE OF YERBA BUENA, TUCUMÁN. METHODOLOGY OF ANALYSIS.

ABSTRACT: A qualitative-quantitative methodology is presented for the analysis of urban forestry in public green spaces. Plaza Nougés, located in the municipality of Yerba Buena, Tucumán, was selected as a case study. The objective is to propose an analysis tool, that make it possible to characterize the quality of urban green spaces. The condition of trees, the landscape value, and the environmental improvements, are considered important factors. The determination of two valuation indices is proposed: the Volumetric Index of Environmentally Active Vegetation (VIEAV [m^3/m^2]), and the Urban Environmental Index (UEI). The developed analysis made it possible to quantify the importance of vegetation, from an urban and environmental point of view. Also has allowed to qualify the landscape value of the place. The results show that Plaza Nougés has an average environmental value, considered good. From an urban planning point of view, depending on the characteristics of its trees, it is considered an attractive place, with cultural, historical and landscape value. The analysis allows a sustainable planning with the inclusion of strategies to improve the quality and the maintenance. The proposed methodology is considered a contribution to the study of urban green space.

Keywords: urban trees, environmental conditions, landscape value

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HABITÁCULOS ADAPTATIVOS PARA MITIGAR LA VULNERABILIDAD HABITACIONAL EN CONTEXTOS DE EMERGENCIA

Gustavo J. Barea Paci, Carolina Ganem, Victoria Mercado, Lorena Córica, Virginia Gassull, Florencia Ginestar, Noelia Alchapar, Ayelén Villalba, Javier Garro, Raúl Mercado, Carlos Abraham, Julieta Balter¹

¹Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía – INAHE – CONICET

Tel. 54-261-6414640 – 54-261-5244310– e-mail: gbarea@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN: El presente estudio surge del Programa de Articulación y Fortalecimiento Federal de las Capacidades en Ciencia y Tecnología en el contexto de COVID-19, con el objetivo de abordar la vulnerabilidad habitacional de los sectores populares en situación de hacinamiento y precariedad debido a la pandemia. Se desarrolló un habitáculo de emergencia para ampliar el espacio en viviendas precarias y mejorar la calidad de vida de los residentes. La falta de espacios adecuados en cantidad y calidad en estas viviendas pone en peligro las medidas gubernamentales en tiempos de pandemia. El enfoque se basó en crear un refugio de emergencia que fuera fácil de construir, económicamente eficiente y adaptable a diversas situaciones. El artículo aborda el diseño y construcción de los habitáculos de emergencia en tres dimensiones: Proyectual-Funcional-Estructural, Económica y Eficiencia Térmica-Energética. El prototipo cumple con criterios de producción de bajo contenido tecnológico, rápido montaje, eficiencia energética y resistencia a las incumbencias climáticas, para clima templado continental como el caso de Mendoza. Se establece que los habitáculos deben servir en las tres primeras etapas de atención de la emergencia, ofreciendo una respuesta rápida y satisfaciendo necesidades biológicas, materiales y técnicas locales.

Palabras clave: habitáculo de emergencia, eficiencia termo-económica, construcción en madera

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo surge en el marco del financiamiento otorgado por el Programa de Articulación y Fortalecimiento Federal de las Capacidades en Ciencia y Tecnología en contexto de COVID-19 (“Aislamiento social, preventivo y obligatorio para los sectores populares en situación de hacinamiento y precariedad habitacional”). La convocatoria buscaba fortalecer las capacidades de provincias y municipios, apoyándose en sus respectivos sistemas científicos y tecnológicos, para acompañar la integración del conocimiento y de los desarrollos tecnológicos y sociales en los procesos de toma de decisiones y en la planificación local de las estrategias de control, prevención y del monitoreo del COVID-19. El objetivo principal del proyecto financiado era desarrollar un *habitáculo de emergencia* que amplíe la disponibilidad de espacio en las viviendas precarias a fin de mitigar la vulnerabilidad y así dignificar mínimamente la vida de las personas que las habitan, para el clima de Mendoza. Los sectores populares no disponen de espacios suficientes en cantidad y calidad que les posibilite quedarse en casa, pensando en los contextos de pandemia. El hacinamiento en sus cuatro vertientes: por lote, por vivienda, por cuarto y por cama son las variables que ponen en riesgo las medidas adoptadas gubernamentales en épocas de pandemias. Las viviendas que habitan no resultan adecuadas por el tipo de materiales utilizados, el servicio sanitario al que acceden y al espacio disponible. Esta vulnerabilidad es de larga data y con la pandemia se ha puesto al descubierto. En estas condiciones el aislamiento ha resultado muy dificultoso, y a veces, imposible de cumplimentar. La reciente pandemia puso en evidencia las desigualdades territoriales y las brechas que existen entre sectores poblacionales, regiones y ciudades. En este estado se elaboró y ejecutó el proyecto desde un enfoque integral, teniendo en cuenta el principio de transversalidad ya que es la forma de optimizar los resultados a lograr.

Si bien se está lejos de efectivizar el derecho a la vivienda y a un hábitat digno y sustentable, el desarrollo del proyecto contribuyó a disponer de una tecnología eficiente, de rápido armado y económica, para cubrir necesidades básicas en emergencias de distintas índoles (sismo, inundaciones, emergencias sanitarias).

Las situaciones de emergencia son sucesos graves, repentinos e importantes, en las que la vida y el bienestar de las personas se ven afectados, llevándolas a una situación de vulnerabilidad. Basando la conceptualización de los refugios en estas premisas, la solución de diseño de un módulo o habitáculo de emergencia debe permitir una acción de reubicación inmediata, que sintetice las características de una vivienda temporal y que además responda a los diferentes ámbitos culturales y territoriales de los lugares donde se presente la emergencia. A diferencia de la vivienda, la urgencia establece ciertos parámetros particulares en los habitáculos. Por un lado, la estructura se reduce y simplifica a la mínima expresión. Y, por otro lado, se flexibilizan las funciones de forma de poder adaptarse fácilmente a distintas situaciones y modos de habitar. El prototipo de emergencia cumple con algunas de las consignas proyectuales encontradas en antecedentes sobre el tema. Según lo planteado por Gustavo San Juan y otros (2017:86), se trata de generar una producción de bajo contenido tecnológico, fácil de construir y montar, de dimensiones mínimas y con la flexibilidad necesaria para tener en cuenta su crecimiento y progresividad, eficiente energéticamente (aislación térmica), resistente al viento y con posibilidad de incluir sistemas solares pasivos.

Ceballos Torres (2018: 8) indica que el refugio debe implementarse lo más rápido posible y servir durante las tres primeras etapas de atención de la emergencia, las cuales oscilan hasta los tres años aproximadamente. Para Alvar Aalto, finlandés especializado en arquitectura de emergencia durante la Segunda Guerra Mundial, debe tenerse en cuenta no solo la rapidez de la construcción sino la satisfacción de las necesidades biológicas, materiales y técnicas locales, y prever cierto grado de permanencia, aunque se trate de unidades mínimas diseñadas para proporcionar un refugio temporal al principio de la emergencia (González Ch. et al., 2014). Viegas y otros (2023) estudiaron una solución habitacional modular de madera en clima templado-cálido. El estudio evaluó el comportamiento térmico, lumínico y las condiciones de estanqueidad. Los resultados mostraron un buen desempeño en cuanto a la iluminación natural durante el día y una respuesta térmica favorable en épocas frías. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora, como la necesidad de acondicionamiento térmico nocturno, mejorar la estanqueidad de la envolvente y reforzar el sombreado y aislamiento térmico en épocas cálidas. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar estos aspectos en la construcción de viviendas populares de madera en climas templados-cálidos.

En este contexto el presente trabajo plantea resolver el diseño y la construcción de habitáculos de emergencia, con la mira en la necesidad de abordar la vulnerabilidad habitacional a través de un enfoque científico, tecnológico, pragmático y de rápida construcción.

METODOLOGÍA

A partir de lo expuesto, es necesario abordar la problemática de la construcción de habitáculos de emergencia desde una mirada integral y multidisciplinar. Por ellos en este trabajo se ordena la metodología a partir de 3 dimensiones de aproximación a la problemática: la Dimensión Proyectual-Funcional-Estructural (fase de diseño y fase constructiva), Dimensión Económica y Dimensión eficiencia termo-energética.

Dimensión Proyectual-Funcional-Estructural, se divide en dos etapas: fase de diseño y fase constructiva. El diseño se resuelve bajo la lógica de la Investigación Proyectual (Sarquis, 2007). Dicho concepto atiende al conjunto articulado de elementos objetivos, también llamados determinados, subjetivos o sensibles, e incorpora en su estructura los aspectos formales, espaciales, las inquietudes tectónicas, además de los programas de actividades. Este concepto recupera los tres polos vitruvianos. En los tres aspectos del Programa Complejo se trabaja tanto en sus dimensiones manifiestas o explícitas acerca de la historia del trío vitruviano, sus datos objetivos, su vigencia actual, etc., así como su dimensión imaginaria y las significaciones que con ella se aporta.

A la hora de proyectar estas tipologías de habitáculos se debe entender que ante una situación de emergencia social, desastre natural o crisis humanitaria existe dos tipos de respuesta que tienen que darse paralelamente: por un lado la rápida instalación de un sistema que sirvan para alojar de manera provisional a las personas, siendo imprescindible que estas sean ligeras, fácilmente transportables y de fácil puesta en funcionamiento, pero además, es igualmente importante velar por la dignidad de las personas y es por esto que es fundamental intentar reproducir de la mejor manera posible una impresión de normalidad. No obstante, la propuesta del Habitáculo Construido tiene la posibilidad de evolucionar hacia una “Vivienda Permanente” o ser modulable y escalable hacia la permanencia. A estas principales premisas se complementan: la flexibilidad, reducción estructural a su máxima expresión y bajo costo.

Luego de tener el proyecto ajustado, se construyeron 2 prototipos en el predio del INAHE-CCT Mendoza, que luego fueron sometidos a mediciones in situ y ajustes técnicos-tecnológicos. Con el objetivo de elegir la correcta materialidad del Habitáculo, se realizó un relevamiento de materiales y tecnologías disponibles en el mercado de la construcción. Se detectaron alternativas con menor coste económico, pero sin resignar la eficiencia energética en términos de confort térmico y lumínicos, apartado que alimenta la Dimensión económica.

Y en la dimensión eficiencia térmico-energética, se realizó un balance térmico-energético estacionario y mediciones in situ. El objetivo del balance estacionario fue valorar las posibilidades energéticas de la envolvente expuesta y su orientación. Para ello se utilizó el método de la Relación Carga Térmica / Colector (RCC) (Balcomb et al., 1982). Este método permite el cálculo del rendimiento de los sistemas solares pasivos. El mismo tiene en cuenta la relación existente entre las pérdidas de calor evaluadas a través del Coeficiente Neto de Pérdidas (CNP) y la ganancia solar, medida a través del área colectora (AC). Esta relación responde a un valor dado para cada sistema solar (ganancia directa, muros acumuladores, invernaderos, etc.). De tal modo que, en un lugar determinado, a través del clima reinante (radiación solar y grados-día), para cada valor de Fracción de Ahorro Solar (FAS), le corresponde un valor de la relación RCC para cada sistema solar. En este caso los habitáculos se ubican en el clima de Mendoza y tienen ganancia solar directa. Se definen en el método las siguientes figuras:

Coeficiente Neto de Pérdidas (C.N.P.): indica la cantidad de energía que se debe entregar al edificio por cada grado centígrado de diferencia entre la temperatura interior y la temperatura exterior de ese lugar por unidad de tiempo, en el sistema internacional de unidades sus dimensiones son [W/°C]. Es una figura importante para conocer las pérdidas térmicas del edificio. *El CNP*, tiene en cuenta las pérdidas de energía a través de techos, muros, ventanas, puertas, infiltración de aire y fundaciones y se calcula como la suma de la multiplicación del área por la conductancia térmica de cada uno de estos elementos de la envolvente. En el método, el autor propone no considerar la pérdida por las ventanas orientadas al norte, ni considerar las ventanas orientadas al este ni al oeste. Las pérdidas por las ventanas norte se encuentran consideradas en el mismo rendimiento del sistema solar y las pérdidas por las ventanas este y oeste, se considera que pierden tanto como ganan (en los meses invernales), entonces en el balance estacionario, es como si no aportaran ni perdieran calor.

Área Colectora (A.C.) es la cantidad de superficie potencialmente colectora de energía solar, a través de un sistema pasivo apropiado (en este caso, ganancia solar directa). *Fracción de Ahorro Solar (F.A.S.)* es la cantidad de energía solar que aprovecha el habitáculo y que se mide en porcentaje respecto de la cantidad de energía total que necesita consumir para mantener el interior a una temperatura constante. Se calcula en términos anuales. *Relación Carga Térmica/Colector (RCC)* es la resultante de dividir el Coeficiente Neto de Pérdidas (CNP) por el área colectora (AC) del edificio, en virtud de la siguiente ecuación:

$$RCC = \frac{CNP}{AC} = \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad [1]$$

De esta manera, se puede calcular el CNP y contando con el AC, podemos calcular la RCC, de acuerdo a la ecuación [1]. Una vez calculada ésta, podemos conocer la FAS, conociendo el Sistema Solar Pasivo a incorporar al edificio. En este trabajo sólo se analiza el sistema solar con ganancia directa.

Para las mediciones in situ se utilizaron 5 micro-adquisidores de datos HOBO U10 (temperatura y humedad). Uno, localizado en el exterior a la sombra, dos de ellos ubicados en cada uno de los habitáculos y dos ubicados en la cavidad del techo ventilado de cada habitáculo. Debido a que la estación más desfavorable para construcciones livianas aisladas, sin masa térmica y poco volumen de aire interior, se decidió realizar las mediciones in situ en verano, como primera instancia. El período de medición fue entre 01-02-2023 y 31-03-2023. El intervalo de toma de datos se fijó cada 15 minutos y para este trabajo se seleccionaron 5 días, entre el 1 y el 5 de marzo del 2023. Para el procesamiento de la información se utilizó el “Excel” y el “HOBOWarePro”

RESULTADOS

Dimensión Proyectual-Funcional-Estructural: Fase de diseño

Según el Arq. Juan Herrero, tradicionalmente, cuando nos referíamos a procedimientos proyectuales, éstos se asociaban pragmáticamente a los procesos de construcción. Y si los resultados se acercaban a las cualidades subjetivas, automáticamente la conversación se desplazaba al territorio de la estética acercando la disciplina a las prácticas creativas. En las últimas décadas, estos criterios se han reemplazado por los métodos de trabajo, que ha permitido a los arquitectos descubrir un campo de reflexión y confrontación referido a la propia práctica del proyecto, a sus estrategias y a la apuesta a punto de las herramientas proyectuales adecuándolas a cada caso.

Este discurso rige las acciones más experimentales y arriesgadas asociadas al proyecto, y sin duda acompaña a lo que llamamos investigación proyectual. El camino recorrido puede ser independiente de los resultados y convertirse en modelo, método, estrategia o protocolo al servicio de otros proyectistas. En este cambio de paradigma proyectual hemos trabajado interdisciplinariamente discutiendo mecanismos e ideas para lograr los objetivos propuestos. Los procesos creativos proyectuales fueron realizados en dinámicas grupales interdisciplinarias, contemplando las premisas planteadas y las necesidades sociales planteadas en el proyecto. Se desarrollaron variados anteproyectos los cuales permitieron llegar a la propuesta final. Se trabajó en el Barrio San Agustín. El barrio es un asentamiento no consolidado de crecimiento espontáneo. Se encuentra en la localidad de Colonia Segovia, del Departamento de Guaymallén, siendo parte del Área Metropolitana de Mendoza. El mismo es parte del ReNaBaP (Registro Nacional de Barrios Populares, n° 3286), y está compuesto por unas 90 familias. Sus dinámicas son propias de lo suburbano (urbano de periferia) en un contexto rural irrigado. Las familias son mayormente monoparentales, cuyas jefas y jefes de hogar oscilan generalmente entre los 18 y los 39 años. Juntos con el personal del Municipio de Guaymallén, se realizó un relevamiento social para una primera selección de familias a las cuales se les iba a instalar los habitáculos.

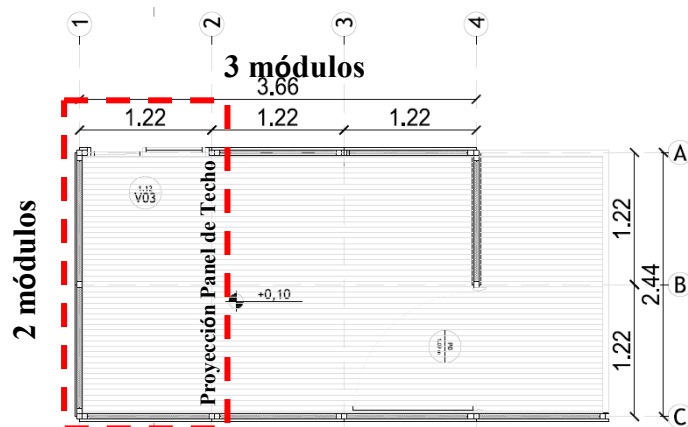
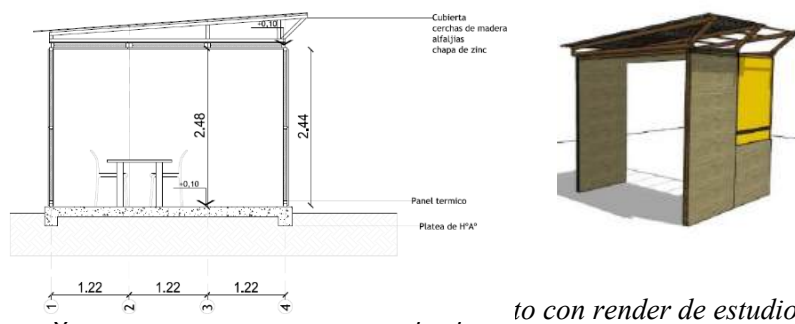


Figura 1. Planta arquitectónica.

La propuesta final es superadora ya que se logra usar recursos indispensables, disminuir la estructura permitiendo que sea desmontable, liviano y trasladable. Es de rápido montaje y almacenable (desarmado). Es un sistema modular y flexible lo cual permite fácilmente ampliarse y adaptarse a las necesidades sociales y espaciales. También la técnica constructiva es transferible para su autoconstrucción. Se pensó en trabajar con **paneles autoportantes aislados**, materializados con placas

de madera OSB y estructura de alfajías de álamos. Para modular arquitectónicamente el proyecto se tomó como medida base la dimensión de la placa de madera OSB, 1,22m x 2,44m. El resultado de este primer prototipo es de 3,66m (3 módulos) x 2,44m (2 módulos), más el espacio de transición, que arma el acceso. La ventaja de modular transversalmente con 2 módulos (2,44m), es que permite apoyar el panel del techo sin necesidad de sumar estructura de apoyo. Cuando todos los elementos quedan unidos, la estructura es solidaria y trabaja estructuralmente en conjunto. El techo funciona como un diafragma estructural y a la vez aislante térmico. Ver figura 1.

Uno de los inconvenientes encontrados en las ideas previas, era la pendiente del techo, ya que en los laterales aparecían detalles triangulares que no responde al sistema técnico-estructural. Para ello se pensó en separar las resoluciones pluviales de la estructural y aislante. Se diseñaron 4 cabreadas donde alojar la chapa trapezoidal creando una cámara ventilada, o sea un techo ventilado separado del paquete estructural. Con esta técnica estamos aportando a la eficiencia energética en verano creando un espacio para que el aire circule y enfríe el elemento en contacto con la radiación solar y, por otro lado, aportando a la unificación de paneles. El efecto de techos ventilados se ha investigado y estudiado por numerosos investigadores a nivel internacional (Zingre, Wan, et al., 2015).



to con render de estudio

Con la premisa de trabajar con los mínimos elementos constructivos, se diseñaron 4 tipologías de tabiques tipo sándwich: Panel para alojar puerta, Panel ciego de techo, Panel ciego vertical y Panel para alojar ventana. A estos elementos constructivos, se le suman las cabreadas para sostener la chapa que arma el techo ventilado.

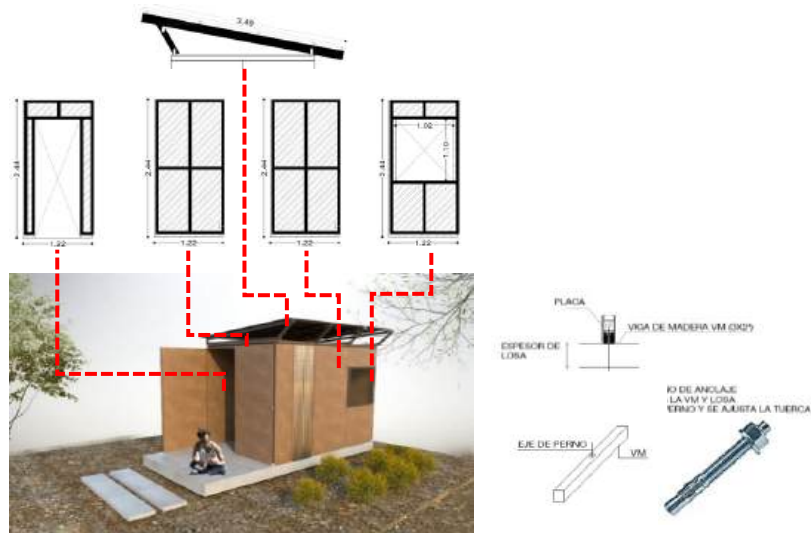


Figura 3. Estudio de tipologías de tabiques y anclaje de paneles al piso.

Los paneles verticales se arman con una estructura de alfajías de álamo cepillada de 2"x2", un alma aislante de 50mm de poliestireno expandido, ruberoid, panel de madera OSB estructural de 18mm por fuera y OSB estructural de 11mm por dentro. La composición de los paneles del techo es igual, lo que se modifica es la estructura, que se plantea con alfajías de álamo de 3"x2", para darle rigidez y aumentar el alma de poliestireno expandido a 70mm. El anclaje al suelo, se hace por medio de una platea de hormigón armado. La unión es del tipo macho-hembra. Una vez realizada la platea, se coloca una alfajía

de 2"x3" con broca del tipo expansible 10x115 Fwa al contrapiso. Las uniones entre paneles se hacen por medio de varillas roscadas de 8mm, con tuercas y arandelas, entre la estructura de alfajías de cada panel. En uno de los paneles, por el lado de adentro se deja un bocado de 11mm para poder ajustar mecánicamente la unión. Un detalle importante en la unión vertical entre paneles es el diseño del desfasaje entre placas de OSB que permiten general juntas de dilatación y cortes de pintura para absorber pequeñas imperfecciones constructivas y de niveles. Ver la figura 4.

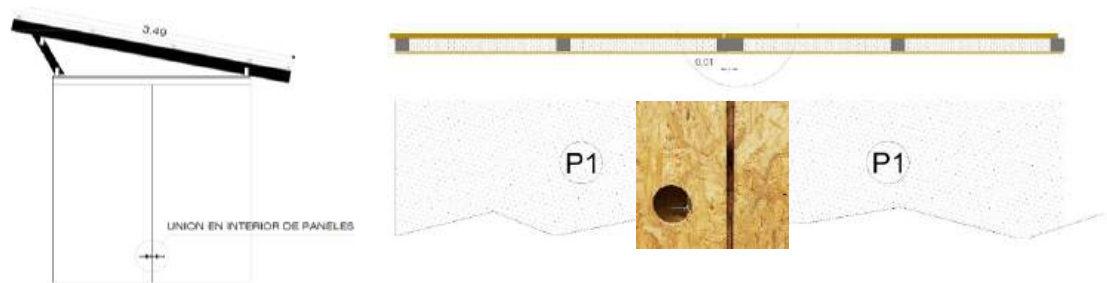


Figura 4. Anclaje entre paneles y detalles constructivos de juntas de dilatación

Un detalle importante en la unión vertical entre paneles es el diseño del desfasaje entre placas de OSB que permiten general juntas de dilatación y cortes de pintura para absorber pequeñas imperfecciones constructivas y de niveles. Para las protecciones de las aberturas hacia el norte, se pensó en usar el mismo recorte de placa de OSB que se cala para colocar la ventana, como alero horizontal. Este alero, además de funcionar como protección solar para verano, debía proteger la ventana como una persiana de cierre. Por ello se estudió el mecanismo que facilite dos posiciones de aleros (verano e invierno) y la posibilidad de usarlo como cierre vertical.

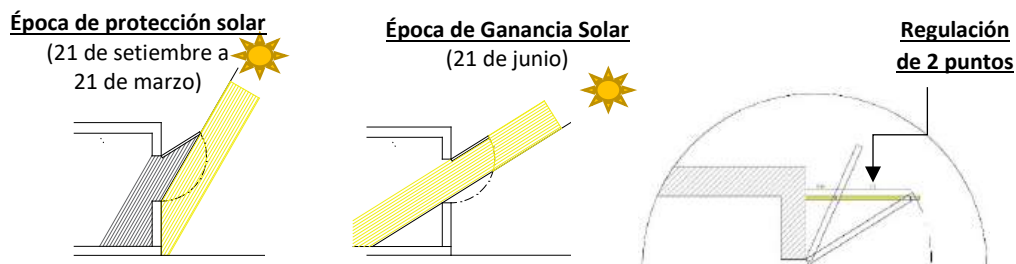


Figura 5. Estudio de protección solar

Dimensión Proyectual-Funcional-Estructural: Fase constructiva

Se construyeron 2 habitáculos en el INAHE, predio del CCT Mendoza para experimentar anclajes, uniones y sistemas constructivos. La construcción se llevó a cabo con el personal del INAHE coordinados por el director del proyecto, Dr. Gustavo Barea. La misma se ha dividido en 3 fases constructivas: Replanteo-Base-Fundaciones, Armado de tabiques y Construcción de techo.

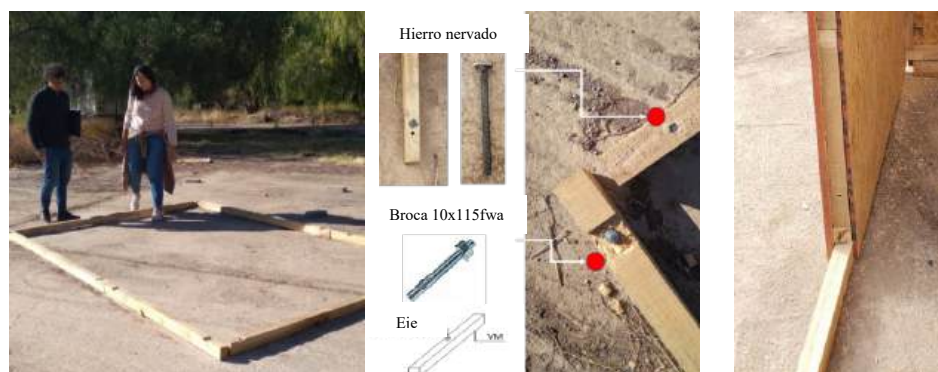


Figura 6. Replanteo y anclaje tabiques verticales a fundaciones.

En el caso del primer habitáculo, el replanteo se lleva a cabo sobre un contrapiso existente en el predio, considerando que no está perfectamente nivelado (simulando una situación real). Con respecto al anclaje

de los paneles al suelo, en la figura 6 se observan las alfajías de 2"x3" colocadas en el contrapiso. Para la fijación se probaron dos sistemas de anclajes: una con hierro nervado de 8mm y otra con broca perno de 10 x115 Fwa. Esta última es la situación ideal para utilizar en la construcción, pero debido a su alto costo y considerando los aspectos contextuales y sociales donde se inserta el proyecto, se prueba una alternativa más económica con hierro nervado, que muestra buenos resultados para la escala del habitáculo y puede realizarse por la misma comunidad con materiales accesibles

Luego en el taller se armaron los paneles de cierre de acuerdo a las tipologías descriptas anteriormente. Una vez armados se comenzaron a colocar los paneles verticales como se observa en la figura 6 y 7. Por otro lado, para agregar un valor de industrialización al proceso de armado de paneles, el equipo de taller elaboró una plantilla/matriz que permite realizar los anclajes para las uniones de paneles de manera precisa y mecanizada. Este es un punto en el desarrollo tecnológico del proyecto que luego se transfiere como capacitación a las personas implicadas en el armado de los habitáculos en las comunidades y equipos técnicos de municipalidades. Para la unión entre paneles se desarrolló un elemento con varilla roscada y una platina, que luego se atornilla a la alfajía interna del panel. En el segundo panel se deja previsto un hueco circular (3 por panel) para colocar la tuerca a la varilla roscada antes mencionada. Esto diferencia al sistema propuesto de los sistemas en seco tradicionales, que trabajan con el panel a media placa y luego lo cierran *in situ*. La unión en las esquinas se hace a 90° y son distintas entre ellas. Esto se debe a la estandarización de los paneles. También este tipo de uniones permite flexibilidad de ampliación y estandarización en la fabricación y construcción, ver imágenes de la derecha en la figura 7.

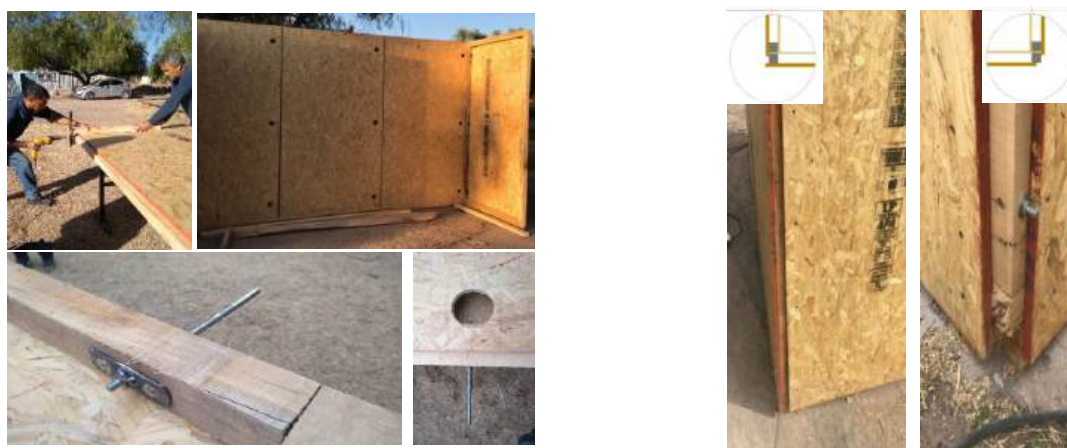


Figura 7. Armado de paneles

En la figura 8 se observa la colocación del techo. El panel de techo se apoya en los extremos de los laterales. El anclaje es igual que en los paneles verticales. La ventaja de la modulación en 1.22 x 2.44 (medida del OSB) es que permite no agregar estructura a las placas del techo. Cada panel es autoportante y solidario estructuralmente. Por encima de los paneles de cierre y estructurales se colocan las cabreadas de alfajías y la chapa, completando el techo ventilado.



Figura 8. Encuentro de paneles verticales con el techo y habitáculos terminados

Es relevante destacar que el prototipo ha sido sometido a pruebas en condiciones reales de exposición al viento zonda, tanto en el barrio San Agustín como en el predio del CCT Mendoza. Durante el año

2023, se ha registrado un mayor número de episodios de viento zonda en comparación con los últimos cuatro años¹.

Dimensión Eficiencia Económica

El rendimiento económico está vinculado a la correcta elección de la materialidad del habitáculo, para lo cual se realizó un relevamiento de materiales y tecnologías disponibles en el mercado de la construcción. En primer lugar, se detectaron alternativas con menor coste económico, pero sin resignar la eficiencia energética en términos de confort térmico y lumínico. Luego, se estudiaron sistemas constructivos existentes. Para ello se diagramó la figura 9, analizando las propiedades físicas en función de los costos. La figura 9 describe la relación del costo económico de diferentes tecnologías de construcción en seco y otras de construcción tradicional para la resolución de techos y paredes en relación al beneficio térmico de acuerdo a lo establecido en la Norma IRAM 11605.

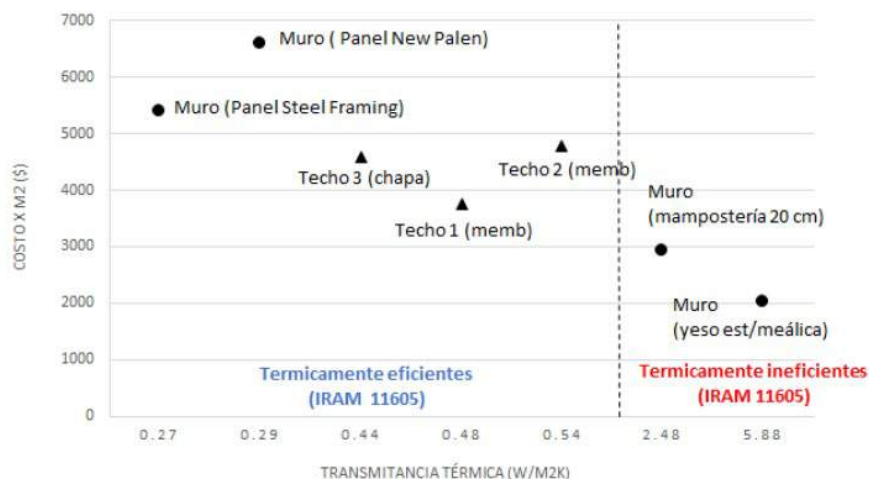
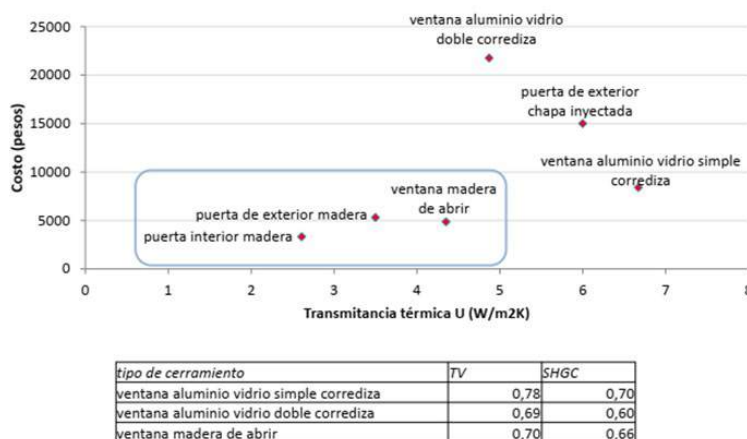


Figura 9. Diagrama de relación costo/beneficio de componentes opacos (muros y techos).

Para toda la envolvente opaca, se optó por paneles del tipo New Panel, fabricados con mano de obra local. Estos paneles exhiben una baja transmitancia térmica, y la fabricación local permitió una significativa reducción de costos. Están compuestos por un doble panel de madera OSB y un núcleo de polietileno expandido.



Nota: vidrio claro (6mm) -TV 0.88 / RV 0.07/SHGC 0.82 / TS 0.771 / RS 0.7/E 0.84/U 5.82 W/m2K. Costo: 2250 pesos el m2.

Figura 10. Diagrama de relación costo/beneficio de aberturas (puertas y ventanas).

En la Tabla 1, se presentan los valores de transmitancia térmica. En la figura 10, se detalla el coste económico de acuerdo al rendimiento termo-energético de aberturas (ventanas y puertas) mediante el cálculo de indicadores, tales como, el Coeficiente de ganancia térmica solar (SHGC) y el Índice de

¹ <https://www.mdzol.com/sociedad/2023/9/22/el-dato-que-muestra-que-en-2023-ya-corrio-mas-viento-zonda-que-en-los-ultimos-cuatro-anos-370115.html>

Transmitancia Visible (TV). Los vidrios de las ventanas de madera son simples vidrios, es la tipología de ventana más usual en las construcciones de este tipo. Estas ventanas son las que se eligieron para este prototipo. En la Tabla 1, se presentan mayores detalles. Los costos se dividieron en 7 ítems: 1. estructura autoportante compuesta por placas OSB y alfajías; 2. aislación hidrófuga y térmica; 3. anclajes y uniones; 4. aberturas; 5. estructura del sobre techo; 6. estructura de base H°A° y 7. instalación eléctrica.

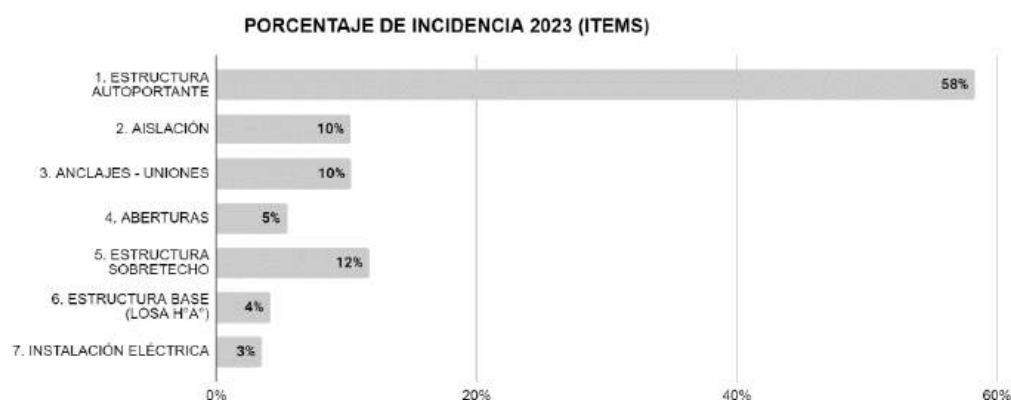


Figura 11. Fuente: elaboración propia, 2023.

El coste total estimado del habitáculo proyectado para el año 2022 fue de 375.000 pesos argentinos, equivalente a un total de US\$ 2.900² (US\$ 320/m²). Al realizar una actualización de costos hasta junio de 2023, se obtiene un valor de 915.588 pesos argentinos, que corresponde a US\$3.400³ dólares (US \$ 380/m²)

Dimensión eficiencia térmica-energética

Uno de los aspectos morfológicos a evaluar es la compacidad y la eficiencia de la forma del edificio. Para hacerlo se utiliza el cálculo del Factor de Área Envolvente Piso (FAEP) y/o el factor de forma. En el caso del proyecto en estudio el valor de FAEP es de 4.33 m²/m². Es decir, el módulo presenta una superficie de envolvente que es igual a 4.33 veces la superficie de piso. Esta característica es importante ya que, en este caso, la forma facilita el intercambio de energía entre interior y exterior. La ineficiencia de la forma está asociada a que el módulo está diseñado para que en casos de emergencia puedan construirse la mayor cantidad posible con los materiales disponibles, por lo que el volumen interior está reducido a la mínima expresión, preponderando el área de envolvente. Asimismo, y por los mismos motivos, no presenta colindancia.

Del análisis de la resistencia y la conductancia térmica de la envolvente se desprende que los mayores intercambios energéticos entre interior y exterior serán a través de los elementos verticales opacos (38%), especialmente en las aberturas orientadas hacia el Sur, y a través del piso-fundaciones (29%). El Techo representa el 8% del intercambio total de energía. En la Tabla 1 se presentan los valores de resistencia y de conductancia térmica calculados para cada elemento.

Tabla 1: Valores de conductancias de los elementos arquitectónicos

Elemento Arquitectónico	Resistencia térmica m ² .k/W	Conductancia térmica W/m ² .K
Cubierta liviana	1.93	0.46
Tabiques OSB+5CM+OSM	1.17	0.71
Aberturas: carpintería de madera, Simple vidrio 4mm	-	3.7
Piso	0.086	2.23

² Datos a valor oficial de venta BNA \$132,30 (junio 2022). El valor del módulo a dolar blue es de US \$150.

³ Datos a valor oficial de venta BNA \$266 (junio 2023). El valor del módulo a dolar blue es de US \$494.

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos en el balance térmico y energético estacionario para el módulo.

Tabla 2: Resultados obtenidos del balance energético

Ítem del Balance	Resultados Obtenidos
CNP ($W/^\circ C$)	52.2
Pérdidas energéticas por Muros (%)	38%
Pérdidas energéticas por Techos (%)	8%
Pérdidas energéticas por aberturas Sur (%)	6%
Pérdidas energéticas por pisos (%)	29%
FAS (%)	8.4%
Calor auxiliar anual (base $21^\circ C$) Kwh/año	1587 kWh/año
Potencia Refrigeración (base $24^\circ C$) (Frigorías Hora o W)	569 frig./hora (662 W)
Factor G	$2.6 W/m^3 \cdot ^\circ C$

El Coeficiente neto de pérdidas (CNP), energía que se pierde por transferencia de calor es de $52.2 W/^\circ C$. En porcentajes, la pérdida por muros representa un 38%, seguidas por el piso en un 29%. Por otro lado, a la energía ahorrada por la utilización de la ganancia solar directa y la conservación, el Factor de ahorro solar (FAS) resulta de un 8.4%. Con estos datos, el cálculo anual del consumo de energía auxiliar para mantener el interior a $21^\circ C$ durante el invierno asciende a 1587 kWh/año ($176 kWh/año/m^2$). En comparación con el consumo promedio de energía en las viviendas en Mendoza, que es de aproximadamente $300 kWh/año/m^2$ (Ganem, 2006), podemos observar que el prototipo se sitúa por debajo de dicho promedio. Para verano, con termostato base de $24^\circ C$, es necesario una potencia de 662W. En cuanto al factor G, donde considera las pérdidas y el CNP, da como resultado $2.6 W/m^3 \cdot ^\circ C$, valor inferior al límite máximo que establece la norma IRAM 11604, para el volumen y la zona climática.

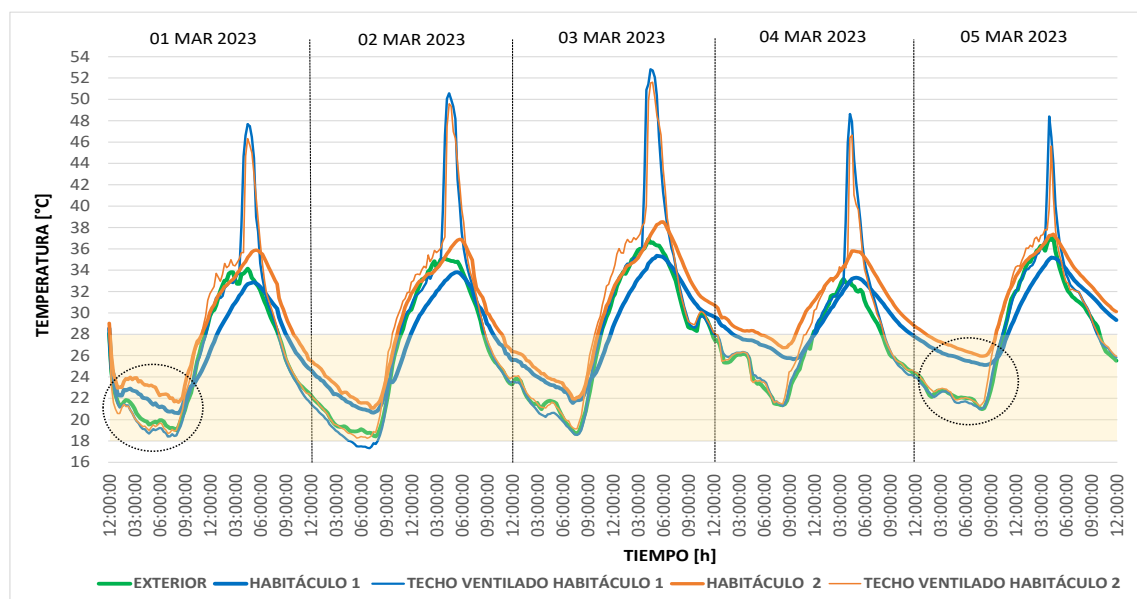


Figura 12. Mediciones comparativas de los módulos habitacionales 1 y 2.

En cuanto a las mediciones *in situ* se decidió realizarlas en una primera etapa en el predio experimental del CCT-CONICET-Mendoza, antes de transferir los módulos a la comunidad. Se midieron en forma simultánea los dos habitáculos a los fines de comparar su comportamiento. Uno de los módulos funcionó como testigo (habitáculo 2) y al otro se le practicaron mejoras relacionadas con la protección a la radiación y la incorporación de aislamiento en el techo ventilado (habitáculo 1). La figura 12 presenta una selección de 5 días entre el 1 y el 5 de marzo de 2023. Se colocaron dos sensores en cada habitáculo, el primero suspendido en el interior y el segundo en el techo ventilado. Un quinto sensor registró la

temperatura exterior dentro del predio. En la Figura 12 se observa en verde la temperatura exterior, en azul la temperatura interior del habitáculo 1 y con el mismo color en una línea más fina la temperatura dentro del techo ventilado. Los mismos sensores se colocaron en el habitáculo 2 (caso testigo) en color naranja en la figura. Las temperaturas interiores en todos los casos superan las temperaturas de confort extendido, consideradas aceptables hasta los 28°C (Roaf y Nicol, 2017). No obstante, nótese que las temperaturas máximas interiores del habitáculo 1, con protección solar y aislamiento en el techo (en color azul en la figura 12) son aproximadamente 3°C inferiores respecto a las del habitáculo 2 o caso testigo (en color naranja en la figura 12). Asimismo, se practicó la estrategia de ventilación nocturna en forma controlada a los fines de poder valorar el impacto de esta estrategia en un módulo liviano. Se ventiló entre las 20hs y las 8hs la noche entre los días 1, 2 y 3 de marzo de 2023. Se identifica en la Figura 12 en un círculo punteado ala izquierda la disminución de las temperaturas interiores durante la noche para el caso de la madrugada del 1 de marzo. En este caso, en ambos habitáculos se aprecia un acercamiento a las temperaturas exteriores nocturnas, siendo el habitáculo 1 (en azul) el que presenta temperaturas inferiores y más cercanas a la temperatura exterior dada la mayor exposición de su envolvente. Las temperaturas interiores se encuentran en este caso entre 1 y 3°C por sobre la temperatura exterior.

Cuando se prescinde de dicha estrategia de ventilación nocturna, como es el caso de la madrugada del 5 de marzo, identificada con un círculo punteado a la derecha en la figura 12, las temperaturas de ambos habitáculos (líneas azul y naranja) se encuentran próximas entre sí y 4 a 6 °C por sobre la temperatura exterior nocturna. No obstante, la disminución de las temperaturas durante la noche, al no presentar masa térmica, la estrategia de ventilación nocturna resulta insuficiente para poder mantener las temperaturas interiores dentro de un rango de confort aceptable. Este desempeño es esperable en construcciones livianas y desmontables, como la que se presenta, con diferencias en las temperaturas interiores diarias en el orden de los 10°C.

CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

La vulnerabilidad habitacional de los sectores populares en situación de hacinamiento y precariedad quedó en evidencia con la pandemia del COVID-19. La presente investigación propone el desarrollo de un habitáculo de emergencia adaptado al clima de Mendoza de fácil construcción, económicamente eficiente y adaptable a diversas situaciones.

Luego de un meticuloso desarrollo proyectual en 3 etapas, se concluye en que el prototipo cumple con criterios de producción de bajo contenido tecnológico, rápido montaje, eficiencia energética y resistencia a las incumbencias climáticas. Las mediciones *in situ* demuestran que es posible el logro de condiciones de confort térmico aceptables y dentro de la zona de confort adaptativo la mayoría del día durante la época estival, pese a la falta de aislamiento y masa térmica en los materiales posibles de utilizar de acuerdo con los requerimientos económicos y de ensamblaje y traslado.

Si se incorpora una adecuada protección solar y se practica la estrategia de refrescamiento nocturno a través de la apertura de las aberturas, las temperaturas interiores son moderadas, siendo en todo momento inferiores a las condiciones exteriores. Por el contrario, si dichas estrategias no están presentes el módulo se sobrecalienta y las condiciones interiores agravan la situación climática exterior. Por los motivos expresados se concluye en que es fundamental el desarrollo meticuloso y la prueba en laboratorio de la tecnología a transferir, a los fines de asegurar el logro de las condiciones interiores esperadas. Asimismo, es de fundamental importancia que una vez que la tecnología está probada sea transferida en forma mediada, explicando su funcionamiento al habitante de manera de que su uso sea el previsto. De este último también dependerá el éxito de la transferencia y la apropiación del desarrollo por sus habitantes.

Como prospectiva se plantea continuar ajustando el prototipo y desarrollando alternativas que mejoren su comportamiento interior, incluso los días más cálidos del año, sin incrementar los costos y complejizar su armado. Por otro lado, se sigue estudiando la posibilidad de ampliación y transformación de habitáculo a vivienda permanente.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero y profundo agradecimiento al Arq. Jorge Mitchell por su invaluable contribución al proyecto que hoy se materializa con éxito. Su visión y liderazgo han sido fundamentales para lograr la financiación por parte del COFECYT. Asimismo, agradecemos el apoyo de los directivos del INAHE, Dras. Andrea Pattini y Erica Correa, quienes gestionaron los recursos necesarios para que el módulo habitacional de emergencia hoy sea una realidad.

REFERENCIAS

- Balcomb J.D., Barley D., McFarland R., Perry J., Wray W., Noll S. 1982. "Passive Solar Design Handbook". Vol 1,2 y 3. United States Department of Energy. Estados Unidos de América.
- Ceballos Torres, María Camila. (2018). "Habitar Después de la Emergencia: Una propuesta constructiva y habitacional de vivienda transitoria para poblaciones afectadas por desastres naturales". Tesis de Grado en Arquitectura y Diseño. Facultad de Arquitectura y Diseño, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D. C.
- Ganem, Carolina (2006). "Rehabilitación ambiental de la envolvente de viviendas. El caso de Mendoza." Tesis Doctoral en Arquitectura. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España: ETSAB-UPC.
- González Chipont María E. y Palero Juan S. (2014). "Módulo habitacional moderno. Reconstrucción, refugio, vivienda mínima". Revista *ArquiSur*, año 4, número 6. Asociación de Escuelas y Facultades de Arquitectura Públicas de América del Sur. ISSN 2250-4206.
- Norma IRAM 11605: " Norma IRAM 11605: "Requisitos generales para la presentación de trabajos escritos". Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), Buenos Aires, Argentina, 1996.
- Roaf, Susan y Nicol, Fergus (2017) "Running buildings on natural energy: design thinking for a different future." *Architectural Science Review* 60(3):145-149.
- San Juan Gustavo, San Juan Graciano, Lenzi Francisco, Callegari Eugenia y Gandini Pablo. (2017). "Modulo Habitacional de Emergencia (MHE) para Sectores Sociales de Extrema Pobreza". Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC), (FAU-UNLP). <http://www.iipacunlp.edu.ar/>
- Sarquis, Jorge (2007) "Itinerarios del proyecto. La investigación proyectual como forma de conocimiento en arquitectura". Buenos Aires: Ed. Nobuko.
- Viegas, G. M., Esparza, J. B., & San Juan, G. A. (2023). Evaluación térmica, lumínica y termográfica de una solución habitacional de madera en clima templado cálido para el hábitat popular. *Hábitat Sustentable*, 13(1), 84–95. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.07>
- Zingre, K. T., Wan, M. P., Wong, S. K., Toh, W. B. T., & Lee, I. Y. L. (2015). "Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate". *Energy*, 82, 813–826.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF ADAPTIVE SHELTERS TO MITIGATE HOUSING VULNERABILITY IN EMERGENCY CONTEXTS

ABSTRACT This study arises from the Program Me for Federal Articulation and Strengthening of Science and Technology Capacities in the context of COVID-19, with the aim of addressing the housing vulnerability of popular sectors in a situation of overcrowding and precariousness due to the pandemic. An emergency shelter was developed to expand the space in precarious housing and improve the quality of life of the residents. The lack of adequate space in quantity and quality in these dwellings jeopardizes government measures in times of pandemic. The approach was based on creating an emergency shelter that is easy to build, economically efficient and adaptable to a variety of situations. The proposal was developed holistically, considering transversality to optimize results. The article addresses the design and construction of emergency shelters in three dimensions: Project-Functional-Structural, Economic and Thermal-Energy Efficiency. The prototype meets production criteria of low technological content, rapid assembly, energy efficiency and resistance to climatic conditions, for continental temperate climate as in the case of Mendoza. It is established that the shelters should serve in the first three stages

of emergency response, offering a rapid response and satisfying local biological, material and technical needs.

Keywords: emergency shelter, thermo-economic efficiency, timber construction.

CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN AULAS ESCOLARES, EN LA CIUDAD DE LA PLATA, BUENOS AIRES, ANTE SITUACIÓN DE PANDEMIA DE COVID-19

Graciela Viegas¹, Gustavo San Juan¹, Jesica Esparza¹, Alejandro Arévalo¹

¹ Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC). Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires. Tel. 0221-4236587/90 int. 250.

e-mail: gachiviegas@yahoo.com.ar; gustavosanjuan60@hotmail.com;
jescasparza@hotmail.com; arevaloarq@yahoo.com.ar

RESUMEN: La Pandemia de COVID-19 puso en evidencia la necesidad de revisar el diseño de las aulas en las escuelas de Argentina en relación a la ventilación. En la provincia de Buenos Aires, surgieron proyectos de investigación para evaluar las condiciones de ventilación de las escuelas, asociando organismos de gestión educacional con el ámbito científico. El propósito fue evitar la propagación de enfermedades contagiosas transmitidas por vía respiratoria a partir de regular los niveles de concentración de dióxido de carbono. Este trabajo tiene por objetivo describir un proyecto de investigación y los primeros resultados de la evaluación de las condiciones ambientales de aulas escolares primarias de la ciudad de La Plata, Buenos Aires, Argentina. La metodología involucra la evaluación y diagnóstico de la concentración de CO₂ como parámetro de referencia de cuatro aulas escolares “tipo” mediante mediciones “in situ” (auditoría ambiental), así como los parámetros ambientales (temperatura, humedad, sonido) a partir de auditoría “objetiva” y los factores de confort del usuario mediante auditoría “subjetiva”. A pesar de la ventilación, los resultados muestran altos niveles de concentración de dióxido de carbono, discomfort auditivo y temperaturas interiores bajas.

Palabras clave: Ventilación en aulas escolares, confort térmico y auditivo, análisis objetivo y subjetivo.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta avances del proyecto de investigación denominado: “Evaluación de parámetros ambientales en aulas escolares y definición de estrategias técnicas, edilicias y comportamentales, que mejoren la ventilación natural para disminuir el riesgo de contagio de COVID-19, durante clases presenciales”. El mismo está financiado desde el Programa Impact.Ar Ciencia y Tecnología, del Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación Argentina, que busca promover proyectos de investigación y desarrollo orientados a apoyar a organismos públicos, encontrar soluciones a desafíos de interés público, que requieran de conocimiento científico o tecnológico para su resolución. En este caso en particular, el proyecto reúne a la Subsecretaría de Planeamiento de la Dirección General de Cultura y Educación, al Ministerio de Salud, la Subsecretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación del Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación Tecnológica de la Provincia de Buenos Aires. Junto con seis institutos y laboratorios de investigación dependientes del CONICET, la UNLP, la CIC¹.

¹ Centro de Investigaciones del Medio Ambiente -CIM- CONICET-UNLP y CICPBA; Centro de Investigaciones en -Química Aplicada- CINDECA- CONICET UNLP-CICPBA; Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido- IIPAC-CONICET/UNLP; Centro de Investigaciones Ópticas- CIOP-CONICET - UNLP – CIC; Grupo de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería, UIDET- LaCLyFA- UNLP. Integrante del Centro Tecnológico Aeroespacial (FI/UNLP); Laboratorio UPL-UNLP-CIC.

El proyecto mencionado, buscó evaluar los parámetros ambientales en aulas escolares y definir las estrategias técnicas, edilicias y comportamentales, que mejoren la ventilación natural para disminuir el riesgo de contagio de COVID-19, durante clases presenciales. En este sentido, es conocida la transmisión de enfermedades por el aire y en particular por aerosoles. Una forma de reducir esta vía de contagio en espacios interiores es la ventilación de los ambientes.

Las necesidades de ventilación dependen de la cantidad de personas por metro cuadrado y del tipo de actividad. Una forma indirecta para medir la calidad del aire y si la ventilación es adecuada, consiste en el monitoreo de la concentración de dióxido de carbono (CO₂). Una concentración del CO₂ por encima del nivel del aire exterior, en función de las normativas internacionales para espacios confinados, indica que la ventilación no es suficiente y que existe una acumulación de gases y aerosoles en el interior. El proyecto desarrollado tuvo como objetivo inmediato, contar con resultados que permitan avalar y optimizar los protocolos de medición del CO₂ en las aulas, evaluando variables tales como cambios de temperatura y tipo de actividad realizada en el aula, para establecer los niveles de apertura óptimos para cumplir dos objetivos: suficiente renovación de aire y adecuado confort higro-térmico de los y las estudiantes, docentes y no docentes.

Concentración de dióxido de carbono en aulas y confort

La importancia de la ventilación en aulas se puso en agenda durante la pandemia de COVID19, debido a la necesidad de volver a las aulas luego del Aislamiento social preventivo y obligatorio (ASPO) iniciado en marzo de 2020 en Argentina. Como la mayor parte de las actividades en las escuelas se desarrollan en ambientes interiores con volúmenes de aire limitados, la ventilación podría asegurar la eliminación de microgotas y aerosoles que contengan el virus, ya que existe un fuerte componente de transmisión de la enfermedad a través de aerosoles producidos por individuos asintomáticos (Prather, 2020). Asimismo, el contagio de COVID-19 así como de otras infecciones respiratorias (gripe, tuberculosis) se producen tanto por microgotas que contienen el virus (> 5 a 10 µm) como por aerosoles (≤5 µm) exhaladas por personas infectadas al respirar, hablar, toser y/o estornudar. Una correcta ventilación es clave para reducir las posibilidades de contagio de este tipo de enfermedades (Roberts, 2021; Krawczyk, 2016), así como otras medidas tales como la distancia social, el uso correcto de barbijos, la tasa de inhalación y las tareas que se desarrollan.

En este sentido, diferentes autores han señalado que el contenido de la concentración de CO₂ en interiores es un indicador que puede utilizarse para evaluar indirectamente la transmisión de enfermedades infecciosas respiratorias, debido a la inhalación de aerosoles (partículas de menor tamaño producidas en gran cantidad en todas las actividades, al respirar, hablar, toser o estornudar) (Krawczyk, 2016) (Rudnick, 2003). El contenido de CO₂ varía de acuerdo a la actividad que se realice, ya sea hablar, realizar actividad física, gritar, aumentando 150 veces respecto a la primera actividad mencionada (Hyde, 2021). Así como también, este parámetro se ve afectado por la humedad relativa y la temperatura (Buonanno, 2020) (Raj, 2020).

La incidencia de la ventilación en escuelas, afecta en cierta medida a otros parámetros de confort. Al hablar de confort ambiental, se debe hacer referencia a una serie de condicionantes o factores, que se pueden clasificar en: Ambientales, tales como confort higro-térmico, lumínico, acústico, y calidad de aire y arquitectónicos, tales como adaptabilidad del espacio, contacto visual, auditivo y estético (San Juan, 2014).

En Argentina, según el BID (Bos, 2020), el promedio de superficie de un aula es de 45 m² con una cantidad de 30 alumnos más un docente, es decir 1,45 m² por individuo, mientras que lo recomendable es un espacio entre 2,25 y 4 m² por cada alumno y el docente, para evitar contagios. En este sentido Morawska, et al (2021) han señalado que el diseño de los edificios debe empezar a contemplar mejores criterios de ventilación, no solo enfocado en la temperatura, el control de olores, el uso de energía y la calidad del aire percibida, sino también en la seguridad del aire que se respira, concluyendo que es una necesidad para prevenir futuras pandemias. Se considera que el aire debería ser considerado como un bien público, como lo es el agua, en función de generar en ese aire aquellas condiciones que eviten la transmisión de enfermedades.

En este sentido, el presente artículo aborda una parte del Proyecto marco y tiene por objetivo: (i) Evaluar y diagnosticar, mediante mediciones “in situ” (técnica de auditoría ambiental, o audit-diagnóstico), la concentración de CO₂ como parámetro de referencia de cuatro aulas escolares “tipo” en la ciudad de La Plata, provincia de Buenos Aires, con diferentes grados de renovación de aire para ser tenidos en cuenta en los protocolos COVID-19. (ii) Evaluar, los parámetros ambientales (temperatura, humedad, sonido), mediante auditoría “objetiva” y los factores de confort del usuario a partir de auditoría “subjetiva”.

METODOLOGÍA

Para arribar a los objetivos, se planteó el análisis “in situ” de escuelas en la ciudad de La Plata, una en zona céntrica y otra en zona periférica del casco urbano con el objetivo de analizar los niveles de CO₂ externo en diferentes situaciones de tránsito y el CO₂ generado en el aula para obtener niveles de concentración en distintas condiciones. Si bien la medición de CO₂ no indica la presencia de COVID, un alto valor de este parámetro implica que el aire en el ambiente medido, no presenta las condiciones óptimas de ventilación. Es por ende que la concentración de CO₂ actúa como indicador del grado de estanqueidad del aire interior. Además, se registró y evaluó el tipo de construcción, materiales constructivos, aberturas y sistema de ventilación, conformación tipológica del aula y otros parámetros ambientales.

En base a la recopilación de información sobre la infraestructura escolar, se seleccionaron 2 escuelas, con localización urbana y suburbana, con diferentes esquemas de ventilación en las 4 aulas auditadas. Las escuelas pertenecen a la Región Escolar 1, de La Plata. Zona Bioclimática IIIb (Templado cálido. Amplitud térmica < 14°C). Una vez seleccionados los escenarios se miden los parámetros ambientales del aula (ventilación natural, temperatura, humedad relativa, sonido) a partir de la metodología de audit- diagnóstico de carácter objetiva (utilizando instrumental de precisión) y los factores de confort del usuario, mediante auditoría de carácter subjetiva (encuesta de opinión), y el nivel de CO₂. Las tipologías edilicias son en doble crujía y en simple crujía. La auditoría se realizó en el período invernal (Registros documentales, concentración de CO₂ máxima).

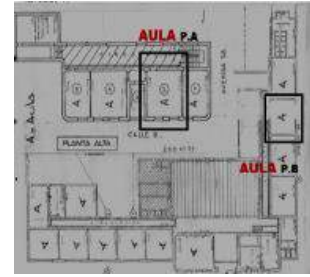
Para el presente estudio, se tomó como nivel máximo de referencia 1000ppm (Norma ASHAE 62.1, 2022) y se adoptó 800ppm según la Guía para Instituciones Educativas del Ministerio de Educación de Argentina (Consejo Federal de Educación, 2021).

Se realizó una medición de las condiciones ambientales de las aulas en el mes de mayo y junio del año 2022, en un período de 15 a 18 días con un registro cada 15 minutos, utilizando el siguiente equipamiento: adquisidor de datos de dióxido de carbono (AD-CO₂ Meter, marca HTI, modelo HT2000); adquisidor de datos electrónico exterior de temperatura y humedad (AD-T+HR, Datalogger ONSET, modelo MX 2301AS) e interior (AD-T+HR+Light, marca HOBO, modelo H08-004-02) y nivel sonoro (Decibelímetro, marca TES, modelo 1350 A). Además, se realizó una encuesta de opinión a los estudiantes que asistieron en el aula auditada con lo cual relacionar los datos objetivos y los subjetivos.

Descripción de los casos de estudio

Uno de los establecimientos es la Escuela Primaria n° 33 (figura 1), localizada en área urbana en calle 8 esquina 38, con 654 alumnos. Su envolvente es de muro de ladrillo común de un espesor de 40cm, el techo de losa de hormigón armado y las carpinterías de madera, simple contacto en planta alta y de perfiles metálicos en planta baja. Pose ventilación natural (cruzada por ventana en pasillo) y su apertura se realiza manualmente.

El otro establecimiento es la Escuela Primaria n° 36 (figura 2), localizada en área suburbana, en calle 25 esquina 495, con 382 alumnos. Su envolvente es de muro de ladrillo común de un espesor de 26cm, el techo de losa de hormigón armado y las carpinterías son practicables de madera, simple contacto. Tiene ventilación natural (no es cruzada) y su apertura se realiza manualmente.



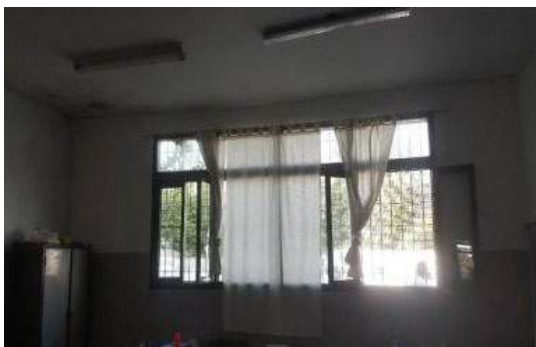
AULA 1

Localización: Planta baja (PB). Ventana hacia Avda. 38. 24 alumnos: 6to grado. Orientación noroeste. La ventana permite escasa ventilación (como se observa en la apertura de las mismas en la fotografía). Se abre la puerta del aula en búsqueda de ventilación cruzada pero no es efectiva. **Encuesta turno mañana.**

AULA 2

Localización: Planta alta (PA). Ventana hacia calle 8. 19 alumnos: 5to grado. Orientación noreste. La ventana permite abrir para una ventilación media, aunque el ingreso de rayos solares hace que tenga que limitarse con postigos (como se ve en la fotografía). Se abre la puerta del aula y una ventana en el pasillo para lograr la efectiva ventilación cruzada. **Encuesta turno tarde.**

Figura 1: EP 33, urbana. Tipología simple cruzija.



AULA 1

Localización: Planta baja (PB). Ventana hacia el patio. 24 alumnos: 6to grado. Orientación suroeste. Las ventanas pueden abrirse francamente por su disposición al patio y su orientación SO que no produce deslumbramiento. La escuela es doble cruzija y no permite la ventilación cruzada efectiva. **Encuesta turno mañana.**

AULA 2

Localización: Planta baja (PB). Ventana hacia calle 25. 24 alumnos: 5to grado. Orientación noreste. Las ventanas pueden abrirse, aunque por su orientación al sol (NE) que produce deslumbramiento y por los ruidos de la calle se bloquean parcialmente. La escuela es doble cruzija y no permite la ventilación cruzada efectiva. **Encuesta turno mañana.**

Figura 2: EP 36. Suburbana La Plata. Tipología doble cruzija. Ambas ventanas abren francamente y es posible ventilar, aunque no se logra la ventilación cruzada efectiva.

Se trata de dos escuelas significativas de la ciudad. La EP 33 de carácter histórico, con una gran matrícula, mientras que la EP 36 es más moderna y a su vez con la mitad de la matrícula de la anterior. En ambos casos, las directivas se mostraron receptivas del trabajo a realizar, y comentaron las acciones que llevaban a cabo respecto a los protocolos de COVID-19. El Ministerio de Educación de la provincia les había proveído de sistemas de detección de CO₂ pero los mismos eran escasos (entre 2 y 5 por escuela), y con deficiencias respecto a su funcionamiento. Sin embargo, tanto docentes como directivos, realizaban testeos en algunos momentos del día para evaluar la concentración en determinadas aulas.

El período medido correspondió a la segunda quincena del mes de mayo y primera quincena del mes de junio de 2022, donde comenzaba a sentirse la baja temperatura en la ciudad. Ambas escuelas tienen dos turnos, mañana y tarde, donde se dictan clases a niños de 5to o 6to grado. Se seleccionaron estos cursos para obtener una mejor respuesta a la medición subjetiva mediante una encuesta papel que se les entregó a los y las niñas durante una jornada de clases, realizadas en formato “taller”.

DESARROLLO

El desarrollo del trabajo se ha estructurado en tres secciones: (i) Auditoría objetiva; (ii) Encuestas de opinión; (iii) Síntesis de resultados objetivos y subjetivos por escuela.

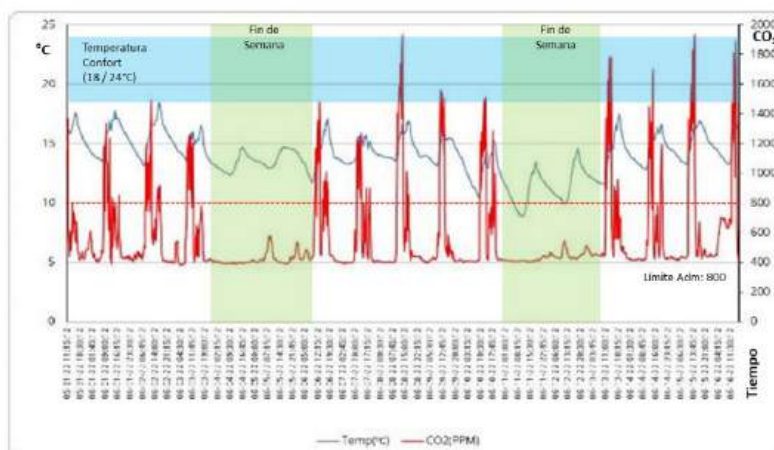
En la sección (i), se realiza un análisis de las mediciones de temperatura, humedad relativa, y concentraciones de CO₂, analizando el período completo de entre 15 y 18 días de medición, donde se indican los fines de semana y el área de confort térmico. Posteriormente se detalla el análisis diario de la jornada de clases, para determinar las diferencias entre los distintos turnos. En ambos casos se registra niveles de concentración de CO₂, considerados como nocivos, ya que valores superiores (800ppm) indican mayor riesgo de contagios a distancia por falta de una correcta ventilación.

En la siguiente sección (ii) se presentan los resultados de las encuestas de opinión respecto a la percepción de la temperatura y la humedad, así como la ventilación y el sonido. Los resultados se expresan porcentualmente y se indica la cantidad de estudiantes por aula.

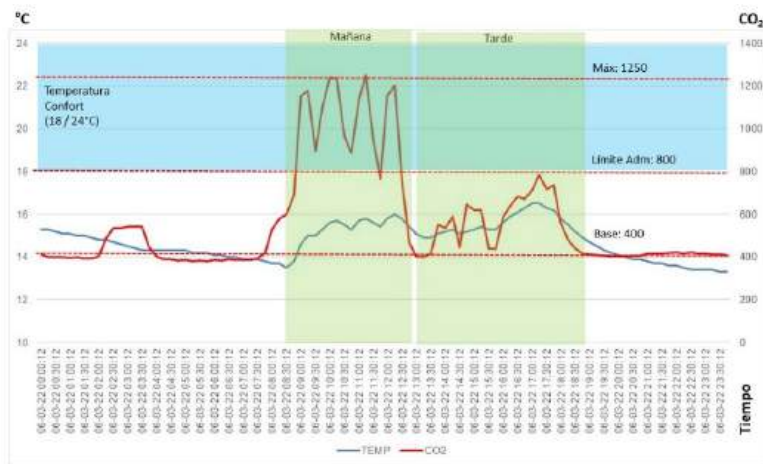
Finalmente, en la sección (iii) se articulan los resultados objetivos con las percepciones de los encuestados y se compara la situación.

Auditoría objetiva

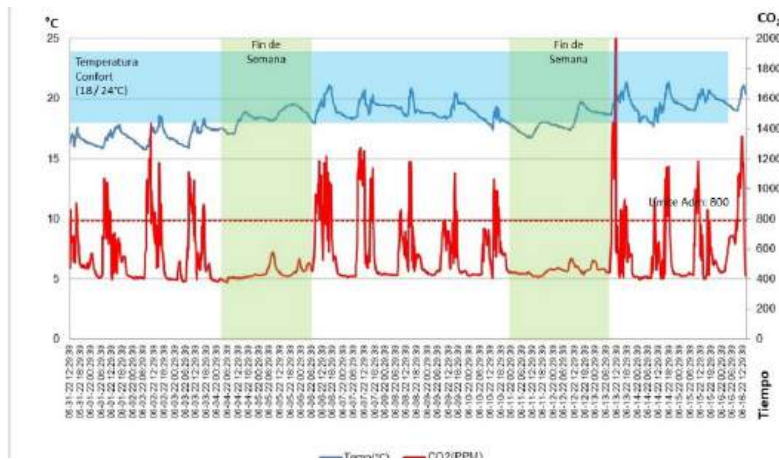
Las figuras 3 y 4 muestran los resultados de temperatura, humedad y concentración de dióxido de carbono medidos en las 4 aulas de ambas escuelas. Las mediciones de base de CO₂ en ambas escuelas cuando estaban sin uso ni ocupación (fines de semana o por la noche) registró entre 420 y 500 ppm. No se detectaron diferencias significativas entre la escuela urbana y la suburbana.



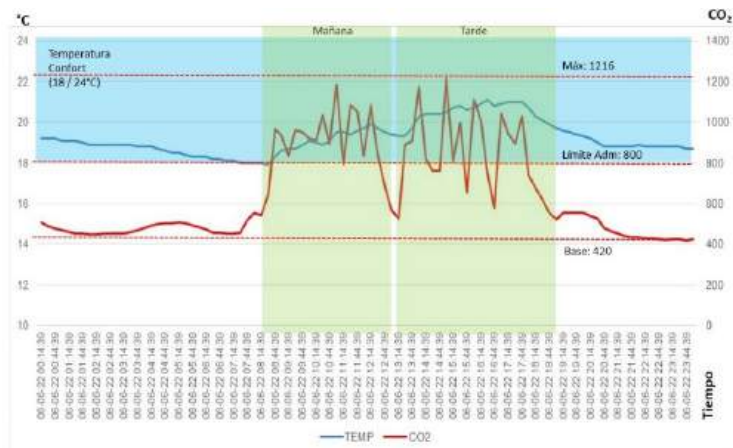
Aula de 6to en planta baja (Orientación NO). CO₂ período de medición



Aula de 6to en planta baja (Orientación NO). CO₂ período diario



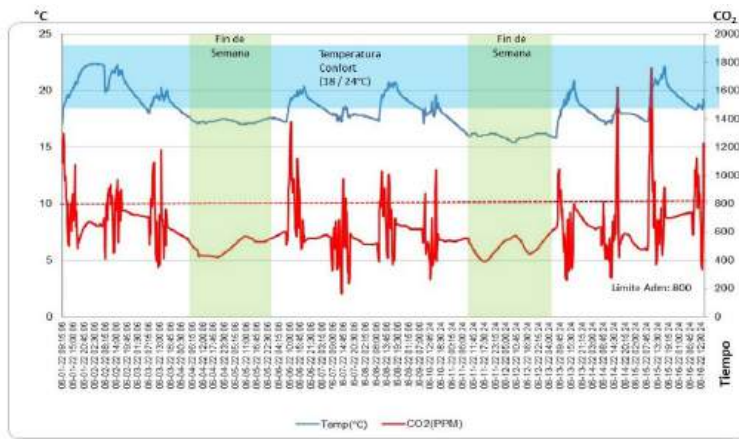
Aula de 5to en planta alta (Orientación NE). CO₂ período de medición



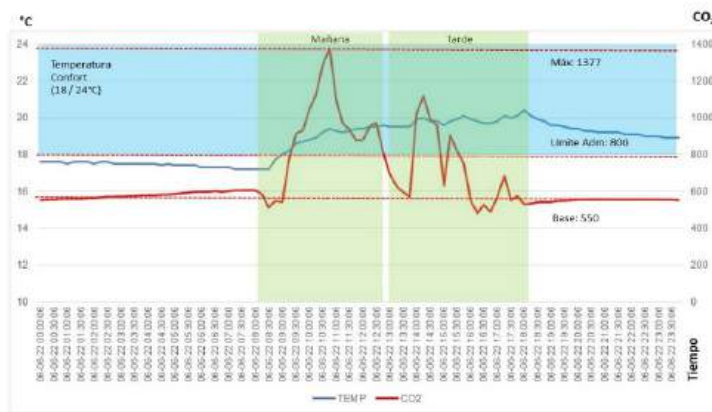
Aula de 5to en planta alta. (Orientación NE). CO₂ período diario

Figura 3: EP 33 – 6 A (PB) y 6 C (PA).

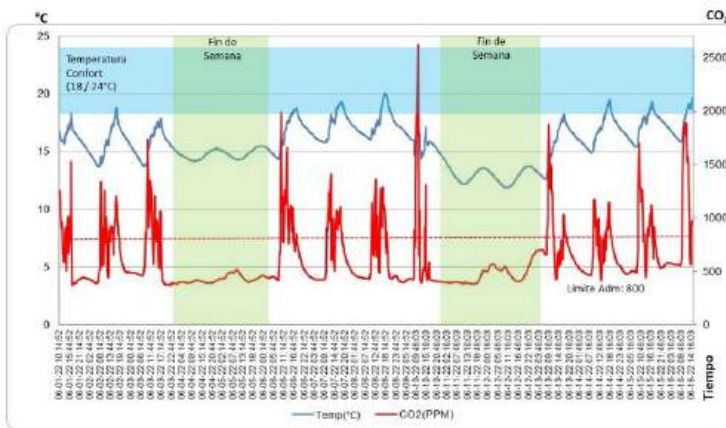
En la escuela urbana se observa una diferencia entre los dos cursos analizados. El aula con 24 estudiantes y ventilación más deficiente presenta valores de CO₂ durante el período que van de 1200 a 2000 ppm. El aula con mejor ventilación (cruzada) y 19 estudiantes, presenta valores menores, con máximos de 1200 ppm en el período. El aula de planta baja presenta sus temperaturas muy por debajo de la temperatura de confort, mientras que la de planta alta tiene la mayor parte de sus temperaturas en confort térmico. Los registros en un solo día muestran que, en el aula al noroeste, las concentraciones son mayores por la mañana que por la tarde, y en la otra aula las concentraciones son similares en ambos turnos. Todos los registros están por encima del límite de 800 ppm.



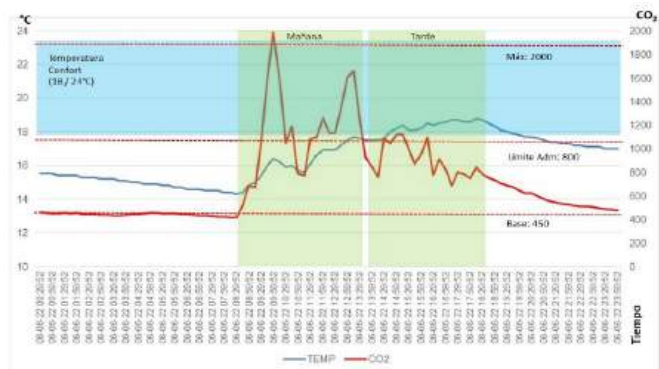
Aula 5to en planta baja calle (Orientación NE). CO₂ período de medición



Aula 5to en planta baja calle. (Orientación NE). CO₂ período diario



Aula 6to en planta baja patio (Orientación SO). CO₂ período de medición



Aula 6to en planta baja patio (Orientación SO). CO₂ período diario

Figura 4: EP 36 – 5to a la calle (PB) y 6to al patio (PB)

La escuela suburbana presenta concentraciones similares en ambas aulas (a la calle o al patio) durante el período. Ambas tienen la misma cantidad de alumnos y similar ventilación de acuerdo al tipo de aventanamiento. El aula noreste tiene mayores temperaturas interiores que se acercan a la zona de confort, mientras que el aula suroeste tiene muy bajas temperaturas que no alcanzan el confort térmico. El aula que da a la calle tiene similares concentraciones de CO₂ en los dos turnos, mientras que el aula que da al patio registra diferencias entre la mañana y la tarde. Todos los registros están por encima del límite de 800 ppm.

De este primer análisis se pudo concluir que no se registran grandes diferencias entre los dos tipos de escuelas (urbana y suburbana) ni tampoco de acuerdo a la orientación ya que las concentraciones de CO₂ son superiores a las requeridas por los protocolos sanitarios (800 ppm).

Encuestas de opinión

Las siguientes tablas (tabla 1 y 2) muestran los resultados de las encuestas realizadas en las 4 aulas durante un turno de la escuela (mañana o tarde) en el período medido. En los cursos asistieron entre 19 y 24 alumnos el día de la encuesta.

Tabla 1: Opinión de los alumnos encuestados. Temperatura y humedad relativa, en las cuatro aulas

Opiniones sobre TEMPERATURA Y HUMEDAD		Orientación	Alumnos	Temperatura										Humedad Relativa				
				Vestimenta (%)			¿Estas bien, tenés frío o calor? (%)			¿Es así todo el tiempo? (%)		¿Se enciende la estufa o el ventilador? (%)		¿Transpira Ud. cuando está en el aula? (%)		¿Transpira el aula? (%)		
				Muy abrigada	Abrigada	Liviana	Bien	Frío	Calor	Si	No	Nunca	Siempre	Alguna vez	Si	No	Si	No
EP 33 Urbana	Aula PB a la calle	NO	24	13	75	13	50	10	40	30	70	14	86	0	13	87	13	87
	Aula PA a la calle	NE	19	32	63	5	50	42	8	22	78	11	21	68	33	67	39	61
EP 36 Suburbana	Aula PB al patio	SE	24	8	83	8	50	50	0	46	54	4	87	9	0	100	67	33
	Aula PB a la calle	NE	24	13	75	13	50	10	40	30	70	0	86	14	13	87	13	87

Como primer análisis se observa que la mayoría de los alumnos (entre 63 y 83%) asisten a la escuela abrigados y en la escuela urbana en aula de planta alta (PA) el 30% asiste muy abrigado. Esto se da como respuesta a las condiciones de ventilación. La mitad de los alumnos se encuentran bien en cuanto a la temperatura, solventados por el abrigo con el que asisten. En la escuela suburbana en el aula suroeste, así como en la escuela urbana del aula noreste entre el 40 y el 50% de los estudiantes perciben frío. En todas las aulas los estudiantes comentan que se encienden las estufas, salvo en una de ellas. Y mayoritariamente los estudiantes no transpiran en el aula, así como tampoco registran que el aula tenga condensación superficial (o transpiración), producto de la ventilación producida a partir de los protocolos.

Tabla 2: Opinión de los alumnos encuestados. Ventilación y sonido en las cuatro aulas

Opiniones sobre VENTILACIÓN Y SONIDO		Orientación	Alumnos	Ventilación								Sonido						
				¿El aire es pesado/viciado? (%)		¿Ventila el aula en esta época? (%)		¿Al tener que ventilar nota alguna molestia? (%)		¿Cuándo ventilan tienen frío? (%)		¿Existen ruidos molestos? (%)		¿El sonido de las voces perturba la actividad? (%)		¿Cómo es el sonido en el aula? (%)		
				Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Confuso	Correcto	Débil
EP 33 Urbana	Aula PB a la calle	NO	24	62	38	100	0	4	96	8	92	100	0	96	4	21	67	12
	Aula PA a la calle	NE	19	37	63	100	0	37	63	37	63	100	0	84	16	31	53	16
EP 36 Suburbana	Aula PB al patio	SE	24	12	88	100	0	15	85	44	56	100	0	80	20	18	56	26
	Aula PB a la calle	NE	24	62	38	100	0	4	96	8	92	100	0	96	4	21	67	12

Como puede observarse los alumnos manifiestan que se ventila el aula (100%) en las dos escuelas y las cuatro aulas. De acuerdo a la opinión, en la urbana en el aula con mayor cantidad de alumnos y

escasa ventilación, se observa que se percibe el aire viciado (62%), así como también en la escuela suburbana en el aula que da a la calle con 24 estudiantes. A nivel general no se percibe molestia al ventilar, salvo en la escuela urbana en planta alta (37%) a la calle donde se abren bien las ventanas (y donde los ruidos de la calle pueden molestar). Por otro lado, no se observa que los estudiantes perciban frío considerable al ventilar, aunque esta percepción se hace presente en el aula orientada al suroeste (aula PB patio EP36, 44%) y en el aula noreste (PA calle EP33, 37%) donde son menos estudiantes.

Finalmente puede observarse que el sonido es una variable clave en el confort de los estudiantes ya que la totalidad de los mismos consideran que existen ruidos molestos, debido a que la ventilación natural provoca que accedan los ruidos desde distintos lugares, como los pasillos, las actividades en los salones de usos múltiples, los recreos, la actividad vehicular tanto en la escuela urbana como la suburbana. En la mayoría de las encuestas se constató que el sonido de las voces perturbaba las actividades de las clases. Durante la visita a los establecimientos se pudo constatar mediante entrevista a las docentes, que debido al uso de barbijos y la necesidad de abrir las ventanas y puertas para ventilar, surgieron problemas de salud en relación a las cuerdas vocales y comenzaron a utilizar micrófonos para dar sus clases.

Síntesis de resultados objetivos y subjetivos por escuela

Las siguientes tablas muestran la interrelación del análisis objetivo y el subjetivo para las dos escuelas, conjugando las dos aulas analizadas.

Tabla 3: Resultados objetivo-subjetivo de la EP 33 urbana

MEDICIÓN OBJETIVA	PERCEPCIÓN DE LOS ESTUDIANTES
<u>CO2 / Ventilación</u>	Aula en Planta Baja
Período completo de medición	Aire viciado (SI): 32%
Mes de medición: Mayo	Siempre se ventila el aula: 100%
Valor máximo: 2000 ppm	Percibe frío cuando se ventila (NO): 92%
Aula en Planta Baja	Molestias por ventilación (NO): 83%
Valor medio mañana: 1000 ppm	Aula en Planta Alta
Valor medio tarde: 600 ppm	Aire viciado (SI): 37%
Valor máximo: 1200 ppm	Siempre se ventila el aula: 100%
Valor base: 400 ppm	Percibe frío cuando se ventila (NO): 63%
Aula en Planta Alta	Molestias por ventilación (NO): 63%
Valor medio mañana: 900 ppm	
Valor medio tarde: 900 ppm	
Valor máximo: 1100 ppm	
Valor base: 420 ppm	
<u>TEMPERATURA</u>	Aula en Planta Baja
Aula en Planta Baja	En confort (Si): 50%
Temperatura de confort de “día tipo” (18 a 24°C):	Tienen frío (Si): 40%
14 y 16°C. No se alcanza	Tienen calor (Si): 10%
Aula en Planta Alta	Aula en Planta Alta
Temperatura de confort de “día tipo” (18 a 24°C):	En confort (Si): 50%
18 y 21°C. Si se alcanza	Tienen frío (Si): 42%
	Tienen calor (Si): 8%
<u>SONIDO</u>	Aula de Planta Baja
	Ruidos molestos (SI): 100%
	El sonido de las voces complica la actividad 96%
	Aula de Planta Alta
	Ruidos molestos (SI): 100%
	El sonido es confuso: 47%

En un análisis combinado es posible observar que, si bien las aulas de la escuela urbana están ventiladas durante el día, los valores de concentración de CO₂ son elevados, alcanzando valores medios de 1000 ppm en el aula más crítica y valores máximos del período de 2000 ppm. En el mes de medición, en cuanto a la ventilación los estudiantes no perciben considerablemente el frío, y no les ocasiona molestias. Esto se funda en que, los alumnos están abrigados dentro de ellas, lo que implica que solventan la necesidad térmica con grado de aislamiento con vestimenta (clo). Se observan diferencias térmicas considerables entre un aula y la otra, y en este sentido las percepciones de los alumnos son similares en ambas condiciones, demostrando que la mitad está en confort y la otra mitad percibe frío. Finalmente, en relación al sonido en aulas, se observa que es una de las dimensiones más críticas, teniendo una relación directa con la ventilación en relación a la apertura de ventanas hacia el exterior (calle) o reverberación interna (de pasillo), ya que en este aspecto hay consenso en las opiniones negativas de los alumnos.

Tabla 4: Resultados objetivo-subjetivo de la EP 36 suburbana

MEDICIÓN OBJETIVA	PERCEPCION DE LOS ESTUDIANTES
<u>CO₂ / Ventilación</u>	Percepción de los estudiantes aula de Planta Baja calle
Período completo de medición	Aire viciado (SI): 62 %
Mes de medición: primera quincena de junio	Siempre se ventila el aula: 100 %
Valor máximo: 1800 ppm (aula a calle)	Percibe frío cuando se ventila (NO): 98 %
2500 ppm (aula a patio)	Molestias por ventilación (NO): 96 %
Aula en Planta Baja calle	Aula de Planta baja patio
Valor medio mañana: 800 ppm	Aire viciado (NO): 88 %
Valor medio tarde: 800 ppm	Siempre se ventila el aula: 100 %
Valor máximo: 1377 ppm	Percibe frío cuando se ventila (SI): 44%
Valor base: 550 ppm	Molestias por ventilación (NO): 85 %
Aula en Planta Baja patio	
Valor medio mañana: 1200 ppm	
Valor medio tarde: 900 ppm	
Valor máximo: 2000 ppm	
Valor base: 450 ppm	
<u>TEMPERATURA</u>	Aula de Planta Baja, calle
Aula en Planta Baja, calle	En confort (Si): 50 %
Temperatura de confort de “día tipo” (18 a 24°C):	Tienen frío (Si): 10 %
18 a 20 °C. En confort	Tienen calor (Si): 40 %
Aula en Planta Baja, patio	Aula de Planta baja, patio
Temperatura de confort de “día tipo” (18 a 24°C):	En confort (Si): 50 %
16 a 18 °C. Algunos momentos en confort	Tienen frío (Si): 50 %
	Tienen calor (Si): 0 %
<u>SONIDO</u>	Aula de Planta Baja, calle
	Ruidos molestos (SI): 100 %
	El sonido de las voces complica la actividad: 96%
	Sonido en aula se percibe correctamente: 62%
	Aula de Planta Baja, patio
	Ruidos molestos (SI): 100%
	El sonido de las voces complica la actividad: 80%
	Sonido en aula se percibe correctamente: 56 %

Respecto a los niveles de dióxido de carbono en la escuela suburbana, ambas aulas presentan valores medios entre 800 y 900 ppm. Sin embargo, a pesar de que el aula está 100% ventilada, se alcanzan valores máximos que superan los establecidos por norma (entre 1800 y 2500 ppm). Respecto a la temperatura, en ambos casos, los estudiantes están abrigados dentro del aula, lo que implica que solventan la necesidad térmica con grado de aislamiento con vestimenta (clo). Las temperaturas se perciben en confort en el aula que registra mayores temperaturas y se percibe frío en las de menores

temperaturas. En el aula de planta baja al patio, orientada al suroeste, la mitad de los estudiantes perciben frío. Respecto al sonido, el 100% de los estudiantes perciben ruidos molestos y mayoritario discomfort respecto a la molestia de las voces. El sonido en las aulas, es una de las dimensiones más críticas, teniendo una relación directa con la ventilación en relación a la apertura de ventanas hacia el exterior (calle, patio) o reverberación interna (de pasillo).

Como se pudo observar del análisis de factores objetivos y subjetivos, la ventilación no logra resolver la disminución de dióxido de carbono, y principalmente aumenta los problemas de discomfort. Se asocian también problemas de discomfort visual a la ventilación que no han sido abordados en este trabajo. Las condiciones urbanas o suburbanas no han mostrado diferencias sustanciales en estos estudios.

CONCLUSIONES

El artículo presentó los avances de un proyecto de investigación desarrollado en el marco de la articulación entre organismos de gestión educacional y grupos de investigación del sector científico del CONICET, la CIC y la UNLP. Se abordó la evaluación y el diagnóstico de dos establecimientos escolares de distinta localización (urbana, suburbana) y tipología arquitectónica, mediante mediciones “in situ” (audit- diagnóstico), la concentración de CO₂ como parámetro de referencia, localizados en la ciudad de La Plata, provincia de Buenos Aires, con diferentes grados de renovación de aire para ser tenidos en cuenta en los protocolos COVID-19. Así como los parámetros ambientales a partir de auditoría “objetiva” y factores de confort del usuario a partir de auditoría “subjetiva”.

Los resultados objetivos respecto a las concentraciones de dióxido de carbono en ambas escuelas no mostraron diferencias considerables, sino que fueron similares, por encima de los niveles aconsejados según normativa adoptada. Asimismo, se pudo comprobar que la ventilación natural practicada en las escuelas, no fue suficiente para reducir dichas concentraciones durante el período frío. Quedó demostrado que dicha ventilación provocó problemas de discomfort térmico y auditivo, abordados en este trabajo. No se ha verificado relación entre las emisiones de CO₂ proveniente del espacio exterior fundamentalmente debidas al tránsito vehicular y la concentración interior.

Finalmente se pudo verificar que los alumnos no registraron la ventilación como un problema en cuanto al confort térmico, ya que no fue sobresaliente la percepción de frío a nivel general. Pero sí percibieron ruidos molestos y dificultades para desarrollar sus actividades normalmente, temas asociados a mantener las ventanas y puertas abiertas durante las clases. Esto también ocasionó problemas de salud en los docentes en relación a los esfuerzos vocales.

Como conclusión final, es posible afirmar que el problema de la ventilación natural en aulas, debe ser abordado en forma integral, considerando todos los aspectos que afectan al confort de los estudiantes, ya sea térmico, visual, auditivo. Por otro lado, la ventilación natural en las condiciones actuales no asegura la correcta desconcentración de partículas de CO₂, con lo cual deben abordarse otro tipo de sistemas que incorporen la ventilación forzada y si es posible, programada.

En futuros trabajos se abordarán otros aspectos que hacen al confort de los estudiantes en relación a la ventilación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los distintos organismos que han hecho posible mediante apoyo y financiamiento la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2022). Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality. https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-62-1-2022?product_id=2501063
Bos, M. Minoja, L. Dalaison W. (2020). Estrategias de reapertura de escuelas durante Covid-19. BID

<https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/document/Estrategias-de-reapertura-de-escuelas-durante-COVID-19.pdf>

- Buonanno, G. Morawska, L. Stabile L. (2020). Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International*, 145, 106112.
- Consejo Federal de Educación (2021). Ministerio de Salud, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Ministerio de Educación. Guía para las instituciones educativas. Condiciones y recomendaciones para habitar la escuela. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/08/guia_para_instituciones_educativas_covid19.pdf
- Hyde Z., Berger D., Miller A. (2021), Australia must act to prevent airborne transmission of SARS-CoV-2, *Medical Journal of Australia*, 10.5694/mja2.51131, 215, 1(7-9.e1).
- Morawska, L. Allen, J. Bahnfleth, W. Bluyssen, Ph. Boerstra, A. Buonanno G. et. al (2021). A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science* 372, 689-691.
- Prather, K. A. Wang, C. C. Schooley, R. T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science*, 368, 1422–1424.
- Raj A., Velraj, R. Fariborz H. (2020). The contribution of dry indoor built environment on the spread of Coronavirus: Data from various Indian states. *Sustainable Cities Soc.* 62, 102371.
- Roberts, M. Hu, J. Azevedo, G. Milner D. (2021). The role of built and social environmental factors in Covid-19 transmission. 102580.
- Rudnick, S. N. Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air.* 13, 237–245.
- San Juan, G. Hoses, S. Martini I. (2014). Aprendizajes en las escuelas del siglo XXI: nota 5. Auditoría ambiental y condiciones de confort en establecimientos escolares. BID.

CONCENTRATION OF CARBON DIOXIDE IN SCHOOL CLASSROOMS, IN THE CITY OF LA PLATA, BUENOS AIRES, IN FACE OF THE COVID-19 PANDEMIC SITUATION

ABSTRACT: The COVID-19 Pandemic highlighted the need to review ventilation in the design of classrooms in schools in Argentina. Research projects arose to evaluate the ventilation conditions of schools, associating educational management organizations with the scientific field in Buenos Aires province. The purpose was to prevent the spread of contagious diseases transmitted by the respiratory route by regulating the concentration levels of carbon dioxide. This work aims to describe a research project and the first results of the evaluation of the environmental conditions of primary school classrooms in the city of La Plata, Buenos Aires, Argentina. The methodology involves the evaluation and diagnosis of the CO₂ concentration as a reference parameter of four “typical” school classrooms through “in situ” measurements (environmental audit), as well as the environmental parameters (temperature, humidity, sound) based on an "objective" and user comfort factors based on a "subjective" audit. The results show high levels of carbon dioxide concentration, hearing discomfort and low interior temperatures, despite the ventilation.

Keywords: Ventilation in school classrooms, thermal and auditory comfort, objective and subjective analysis.

ANÁLISIS DE TRAZAS FERROVIARIAS PARA SU ADAPTACIÓN A UN SISTEMA ELÉCTRICO A BATERIAS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

Garay Jorge José¹ ; Cuestas Facundo¹ ; Ibarra Santiago¹, Benito Marcos¹

¹Laboratorio de Energías Alternativas (LEA), Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional. Paraná (UTN FRP), CP: 3100 Entre Ríos, Argentina.

e mail: lea@frp.utn.edu.ar

RESUMEN: En los últimos años se incrementó el interés de recuperar el transporte ferroviario mediante el aumento de inversiones. Es por esto que desde el Laboratorio de Energías Alternativas de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Paraná se decidió realizar el presente estudio, que tiene como objetivo analizar las trazas ferroviarias tanto en servicio como fuera de servicio que unen Paraná, Entre Ríos – Argentina, con las localidades vecinas, con el fin de proveer los datos necesarios para el análisis de la factibilidad y adaptación de la red interurbana a un sistema de tren eléctrico alimentado a baterías.

Para ello, se estableció una metodología de relevamiento y análisis mediante sistemas de información geográfica, imágenes satelitales y datos estadísticos, identificándose y limitándose a tres trazas posibles: “Paraná-Aranguren”, “Diamante-Hasenkamp” y “Paraná-El Pingo”. El estudio permitió determinar las principales variables de la traza: estaciones, pasos a nivel, alcantarillas, puentes, disponibilidad de superficie, longitud máxima entre estaciones de carga, pendientes máximas y mínimas, radios de curvatura máximos y mínimos, volumen de pasajeros de diseño, entre otros datos.

Palabras clave: ferrocarril, traza ferroviaria, georreferencia, variables de diseño.

INTRODUCCIÓN

El ferrocarril es un sistema de transporte de personas y mercancías conocido por tener grandes ventajas respecto a otros, como su bajo consumo energético por tonelada/kilómetro transportado, bajo impacto ambiental y la posibilidad de realizar transportes masivos (García Álvarez, 2007). En la actualidad el desarrollo tecnológico y la electrificación de las líneas ha permitido desarrollar trenes de alta velocidad en los que se introdujo un mayor nivel de automatización.

La red ferroviaria argentina a partir del año 1960, y con el fin de privilegiar el transporte automotor, sufrió una continua desarticulación donde, para el año 2002, solo se mantuvieron algunas líneas de trenes urbanos y unos pocos ramales de larga distancia. Esto implicó la reducción de la red de 47.500 a 10.000 kilómetros de vías con un mantenimiento casi nulo, material rodante en pésimas condiciones y empresas concesionarias del servicio en proceso de quiebra (Lopez – Waddell – Martinez, 2016). En los últimos años el Estado Argentino manifestó el interés de recuperar el transporte ferroviario mediante el incremento de inversiones en el sector, reactivando ramales deshabilitados o desmantelados, avanzando en obras de electrificación y procediendo con la renovación del material rodante. En la actualidad se cuenta con aproximadamente 18.500 kilómetros de vías activas (Comisión Nacional de Regulación del Transporte, 2021). La provincia de Entre Ríos donde se desarrolla nuestro estudio no fue la excepción, quedando solamente en actividad para transporte de cargas el Ramal UB del ferrocarril General Urquiza (fuera del alcance de nuestro estudio) y para transporte de pasajeros Paraná-Enrique Berduc el Ramal U15 del ferrocarril General Urquiza.

Los ramales que ingresan en la zona de influencia anteriormente descrita son el “U5” que permite recorrer la traza “Paraná-Aranguren”, los ramales “U11”, “U12” y “U16” que recorren la traza “Diamante-Hasenkamp” y el ramal “U15” que recorre la traza “Paraná-El Pingo”. Para cada recorrido se analizan sus principales variables y particularidades

METODOLOGÍA

Debido a la amplitud de la zona de influencia se opta por aprovechar los avances tecnológicos de los últimos años. Herramientas como el software de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales de libre acceso que sirven para realizar mapeos, obtener datos georreferenciados y procesar planialtimetrías de las trazas definidas. Es así como se utiliza el potencial del software Google Earth Pro en combinación con herramientas de CAD (diseño asistido por computadora) para obtener la información planialtimétrica objetivo.

Por otro lado, también se utilizarán planillas de cálculo para procesar información estadística de entes oficiales del Estado Argentino, con el fin de conseguir un valor estimado de cantidad de pasajeros que podrían utilizar el servicio.

Relevamiento de trazas

Teniendo en cuenta la extensión territorial abarcada, para el relevamiento de las trazas se utilizó el software Google Earth, el cual permite acceder a imágenes satelitales, datos geográficos y geodésicos. En esta etapa se realizaron tres tareas: delimitación del área de influencia, determinación de ejes de vía, georreferenciación de puntos particulares (estaciones, pasos a nivel, obras de arte, aparatos de vía).

Se utilizó la herramienta “agregar polígono” para delimitar el área de influencia (Figura 1), la herramienta “agregar ruta” para marcar los ejes de vía (Figura 2) y la herramienta “marca de posición” se utilizó para ubicar y georreferenciar puntos particulares (Figura 3). Esta secuencia de tareas se realizó para cada uno de los ramales en estudio.



Figura 1. Polígono de área de influencia

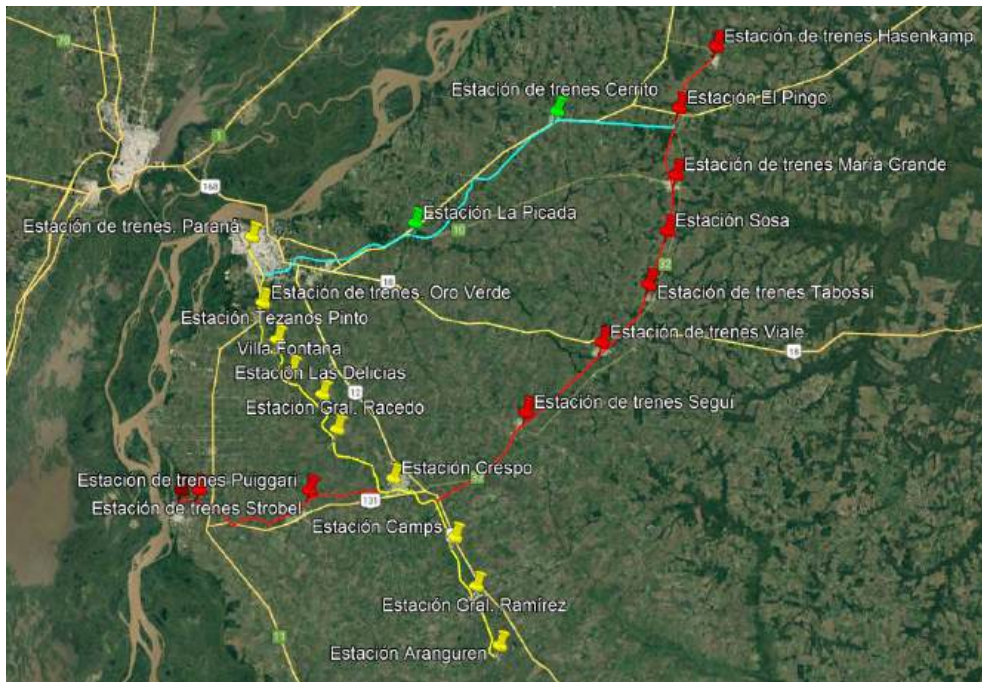


Figura 2. Trazas relevadas

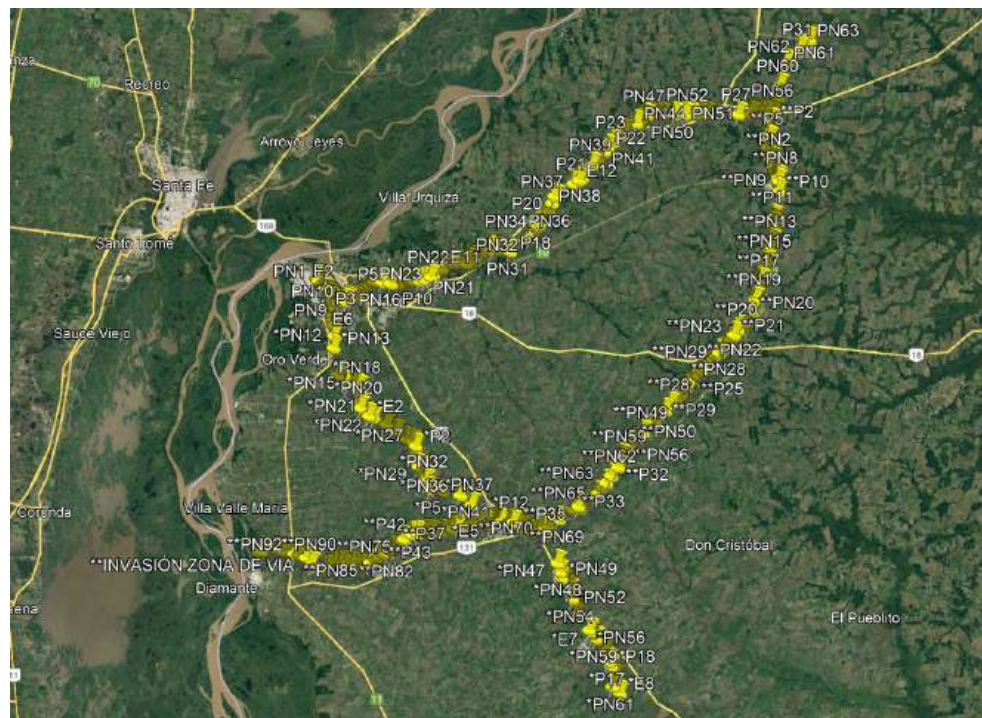


Figura 3. Singularidades de los tramos

Procesamiento de datos topográficos en CAD

Obtención de perfiles

La compatibilidad de Google Earth con sistemas de CAD, en forma nativa y a través de extensiones, permite importar datos georreferenciados al sistema WGS84.

De esta manera, se logra obtener una nube de puntos coordinados en el espacio, estos datos permiten ser procesados de tal forma que crean una triangulación con la suficiente precisión para considerarse una superficie. El software de CAD permite procesar esta triangulación para crear curvas de nivel (Figura 4) sobre las cuales se usa el eje de vía importado con antelación para obtener perfiles

longitudinales que surgen de la proyección del corte del eje seleccionado con la superficie creada. De estos perfiles dibujados se obtienen las principales variables de la traza, ya que, sobre ellos, complementados por una retícula o grilla a escala, se pueden medir distancias, cotas y pendientes, así como también observar accidentes del terreno. Las nombradas características físicas de la vía resultan, a posteriori, determinantes como parámetros de entrada para el futuro dimensionamiento del sistema tractor eléctrico, permitiendo obtener las pendientes de cada tramo necesarias para calcular las proyecciones de las fuerzas en el diagrama de cargas.

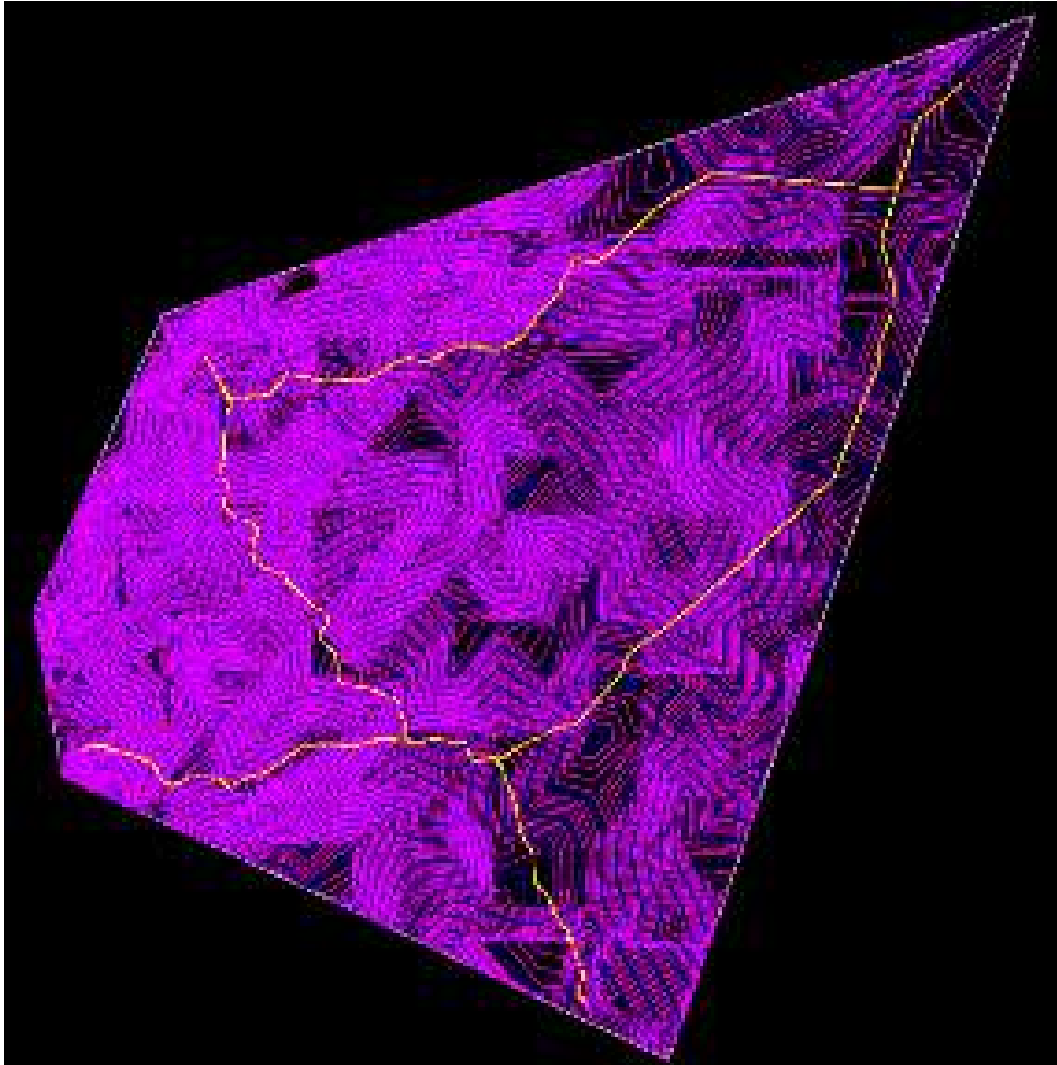


Figura 4. Triangulación y Curvas de Nivel

Obtención de radios de curvatura

En cuanto a la determinación de radios de curva, se utilizaron las líneas de eje de vía en planta para medir, mediante acotación de arco, los radios de giro de cada una de las curvas que componen las tres trazas seleccionadas.

La presentación final se exporta a una planilla de cálculo donde se presentan los datos coordenados (x ; y ; z) del eje de vía con una precisión de 100 metros entre perfiles transversales y se calcula las pendientes mediante la siguiente fórmula: $(y_2 - y_1) / (x_2 - x_1) * 100$, así como también se anotan los radios de curvatura medidos entre las progresivas de inicio y fin de curva. El valor del radio de curvatura permite obtener la fuerza de rozamiento por curvatura, fuerza calculada en el modelo matemático del diagrama de cargas.

Análisis del caudal de pasajeros

El análisis del caudal de pasajeros se realizó de acuerdo con dos metodologías en función de los datos estadísticos recabados. Este dato tiene dos objetivos, primero estimar la factibilidad de la demanda de un servicio de transporte público que vincule estas ciudades, y por otro, el dimensionamiento del vehículo por las cargas estimadas a transportar.

La primera consta de datos puros procesados por la Comisión Nacional de Regulación del Transporte, la cual brinda los valores históricos de pasajes vendidos en las líneas férreas, los cuales son de libre acceso a través de la página web del ente (Comisión Nacional de Regulación del Transporte, 2021).

La segunda metodología utilizada surge de la aplicación de la determinación del tránsito medio diario anual (TDMA) en las rutas terrestres que unen las localidades a las que se proyecta la llegada del tren. Estos datos se encuentran disponibles en la página web de la Dirección Nacional de Vialidad, donde estableciendo el tramo a analizar entrega datos de serviciabilidad, TDMA y porcentajes de tipos de vehículos. La cantidad de pasajeros fue estimada mediante las siguientes fórmulas:

<i>Livianos: TDMA * % de livianos * Capacidad del vehículo</i>	(1)
<i>Bus: TDMA * % de pesados * % Bus * Capacidad del vehículo</i>	(2)

Las rutas analizadas son las que se pueden observar en la siguiente tabla (Tabla 1).

Tabla 1. Rutas terrestres que vinculan la zona de influencia				
<i>RUTA</i>	<i>CIUDADES QUE UNE</i>	<i>KM INICIO</i>	<i>KM FIN</i>	<i>DISTANCIA</i>
12	<i>Nogoyá-Crespo</i>	361.95	420.10	58.15 km
12	<i>Crespo-Paraná</i>	420.10	451.75	31.65 km
12	<i>Paraná-Cerrito</i>	467.08	500.72	33.64 km
12	<i>Cerrito-Int. RN N°127</i>	500.72	511.77	11.05 km
12	<i>Int. Rn N°127-Hernandarias</i>	511.72	543.21	31.49 km
127	<i>Int. Rn N°12-El Pingo</i>	64.11	71.37	7.26 km
131	<i>Pto. Diamante-Int. Rp N°11</i>	0.00	8.93	8.93 km
131	<i>Diamante-Crespo</i>	8.93	40.92	31.99 km
18	<i>Paraná-Viale</i>	14.55	52.81	38.26 km
18	<i>Viale-Int. Rp N°32</i>	52.81	60.17	7.36 km

RESULTADOS

Análisis de las trazas

A partir del análisis de los perfiles longitudinales, los cuales en CAD se elaboraron en escala horizontal 1:1000 y escala vertical 1:100 se pudo extraer las características intrínsecas de cada una de las trazas. A continuación, se presentan gráficos de dispersión que, aunque no estén en escala, permiten graficar el perfil para observar los máximos, mínimos y pendientes de las trazas.

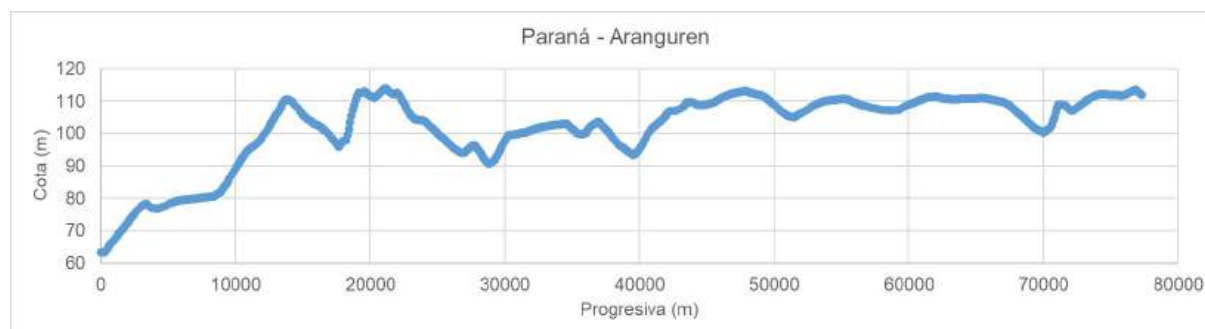


Gráfico 1. Perfil longitudinal traza Paraná – Aranguren

Para la primera de las trazas presentadas, (Gráfico 1) la cual considera su inicio (PK 0+000) en la Estación de Trenes de la localidad de Paraná, pasando por Oro Verde, Tezanos Pinto, Villa Fontana, Villa Gdor. Etchevere, Gral Racedo, Crespo y Gral. Ramírez, llegando a su final en la Estación de Trenes de la localidad de Aranguren (PK 77+280). Se puede concluir en que el punto de mayor altitud de la traza se da en la PK 21+104 con una cota elipsoidal de 113.85 metros de altitud en el sistema WGS84, mientras que el punto más bajo se encuentra en PK 0+100 con un valor de 63.27 metros. Respecto a las pendientes a vencer, se encontró que el máximo es de 1.94% ubicado en el tramo de PK 18+504 a PK 18+604.

En cuanto a los radios de curva, el valor máximo de ubicó en $R_{max}= 2281.69$ metros entre PK 26+092 y PK 26+692 y el mínimo valor en $R_{min}= 405.64$ metros entre PK 47+108 y PK 47+208.

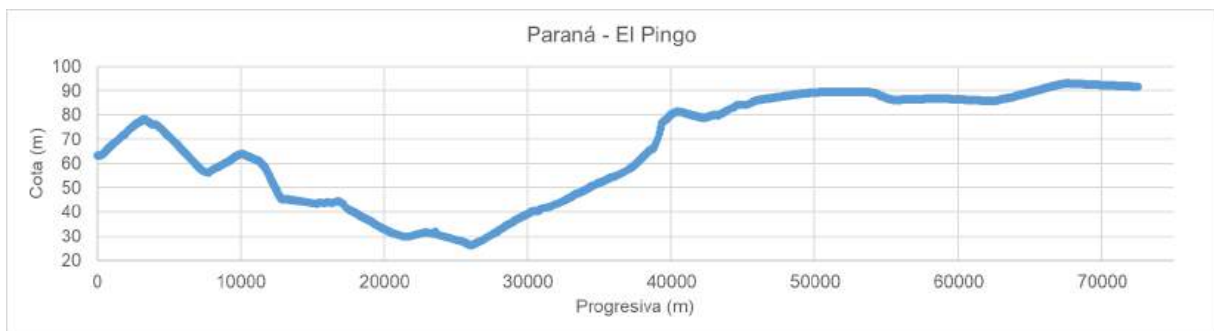


Gráfico 2. Perfil longitudinal traza Paraná – El Pingo

La segunda de las trazas analizadas, (Gráfico 2) para la cual se considera su inicio (PK 0+000) en la Estación de Trenes de la localidad de Paraná y su final en la Estación de Trenes de la localidad de El Pingo (PK 72+474) llegando de forma intermedia a las comunas de Colonia Avellaneda, Sauce Motrull, La Picada, El Palenque y Cerrito. Presenta el punto de mayor altitud de la traza en la PK 67+562 con una cota elipsoidal de 92.97 metros de altitud en el sistema WGS84, mientras que el punto más bajo se encuentra en PK 26+060 con un valor de 26.32 metros. Respecto a las pendientes a vencer, se puede decir que el máximo valor es de 2.15% ubicado en el tramo de PK 39+251 a PK 39+351.

En cuanto a los radios de curva, el valor máximo de ubicó en $R_{max}= 3096.49$ metros entre PK 42+890 y PK 43+290 y el mínimo valor en $R_{min}= 503.39$ metros entre PK 37+390 y PK 38+190.

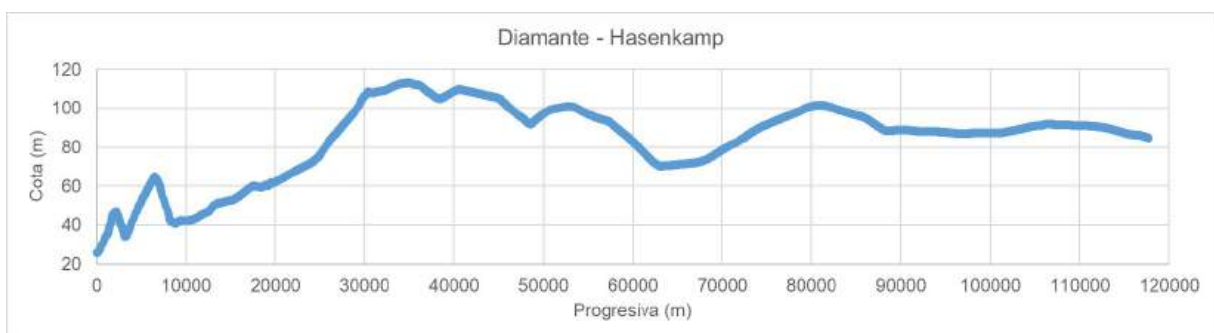


Gráfico 3. Perfil longitudinal traza Diamante - Hasenkamp

Finalmente, para la tercera de las trazas, (Gráfico 3) la cual considera su inicio (PK 0+000) en la Estación de Trenes de la localidad de Diamante, pasando por Strobel, Libertador San Martín, Crespo, Seguí, Viale, Tabossi, Estación Sosa, María Grande, El Pingo y llega a su final en la Estación de Trenes de la localidad de Hasenkamp (PK 117+700), se puede concluir en que el punto de mayor altitud de la traza se da en la PK 34+931 con una cota elipsoidal de 112.93 metros de altitud en el sistema WGS84, mientras que el punto más bajo se encuentra en PK 0+100 con un valor de 25.64 metros. Respecto a las pendientes a vencer, se encontró que el máximo es de 2.00% ubicado en el tramo de PK 1+600 a PK 1+700.

En cuanto a los radios de curva, el valor máximo de ubicó en $R_{max}= 2325.36$ metros entre PK 34+179 y PK 34+579 y el mínimo valor en $R_{min}= 399.85$ metros entre PK 40+331 y PK 40+731.

Del análisis de pasajeros

Párrafo aparte se presentan los resultados del análisis de pasajeros. De las estadísticas de CNRT se desprende que el único ramal en servicio en la zona es servicio regional C. Avellaneda - Paraná - Enrique Berduc (vías que en nuestro estudio son parte de la traza Paraná-El Pingo) donde se puede observar que para el año 2022 se transportó un total de 58875 pasajeros.

En cuanto al transporte por rutas terrestres que surge del análisis del tránsito medio diario anual (TDMA), se obtuvo que el potencial pasaje para las distintas trazas es el siguiente (se desprecia el transporte de cargas).

<i>Paraná - Aranguren: 14437 pasajeros.</i>
<i>Paraná - El Pingo: 22516 pasajeros.</i>
<i>Diamante - Hasenkamp: 21770 pasajeros.</i>

Tabla 2. Cálculo del tránsito medio diario anual

RN°	CIUDADES QUE UNE	TDMA	% PES.	% LIV.	DEL %	CANT. PERS.		CANT. PERS. EN TRANSITO	
					PES.	LIV.	BUS	LIV.	BUS
12	<i>Nogoyá-Crespo</i>	3114	27.20	72.80	6.03	2	20	4534	1021
12	<i>Crespo-Paraná</i>	4750	20.10	79.90	6.76	2	20	7591	1291
12	<i>Paraná-Cerrito</i>	4358	28.30	71.70	10.18	2	20	6249	2511
12	<i>Cerrito-Int. RN N°127</i>	3800	26.20	73.80	-	2	20	5609	-
12	<i>Int. Rn N°127-Hernandarias</i>	1900	26.60	73.40	8.71	2	20	2789	880
127	<i>Int. Rn N°12-El Pingo</i>	2360	36.00	64.00	8.57	2	20	3021	1456
131	<i>Pto. Diamante-Int. Rp N°11</i>	4000	13.00	87.00	-	2	20	6960	-
131	<i>Diamante-Crespo</i>	3000	19.30	80.70	-	2	20	4842	-
18	<i>Paraná-Viale</i>	2840	19.10	80.90	16.24	2	20	4595	1762
18	<i>Viale-Int. Rp N°32</i>	1828	26.60	73.40	9.54	2	20	2684	928

CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado, podemos aseverar que la metodología aplicada así como los resultados obtenidos respecto a las variables sensibles de las trazas son suficientes y satisfactorios para abordar la continuidad de la etapa de factibilidad de adaptación de la red ferroviaria a un sistema eléctrico, siendo el formato final acorde a lo necesario para funcionar como datos de entrada al futuro script de Python que determinará las variables físicas claves para el dimensionamiento del sistema rodante.

Los resultados nos indican también, en principio, que la traza que presenta mejores condiciones técnicas de adaptabilidad al sistema es el recorrido Paraná-Aranguren debido a las bondades topográficas del territorio que presenta las menores diferencias de nivel y menor pendientes a vencer. Este recorrido une una cantidad importante de localidades con la ciudad capital, aunque de acuerdo al nivel de pasajeros resultante del estudio sería la de menor impacto socio-económico.

El procedimiento aplicado aporta un método de obtención de datos replicable en cualquier trazado, sea ferroviario o no, con una potencialidad en su uso para la elaboración de factibilidades de proyectos, en pos de desarrollar sistemas de transporte eficientes y enfocados en soluciones puntuales, maximizando su aprovechamiento.

REFERENCIAS

Libro

Saus M. A. (2022). Atlas del Ferrocarril Begrano-redes de escala nacional y regional desde una mirada santafesina (1° edición) Ediciones UNL - isbn 978-987-749-394-8

López, Mario Justo ; Waddell, Jorge Eduardo ; Martínez, Juan Pablo. Historia del ferrocarril en Argentina. 1ª ed. Carapachay: Lenguaje Claro, marzo 2016. 332p. ISBN 978-987-3764-09-7.

Artículo de revista

García Álvarez, A.(2007) Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos. Anales de mecánica y electricidad. Vol. LXXXIV, Fas. V, sept.-octub.

Fuente de la Web

Estadísticas del transporte ferroviario. Comisión Nacional de Regulación del Transporte. <https://www.argentina.gob.ar/transporte/cnrt/estadisticas-ferroviarias>

DNV Nivel de servicio. Dirección Nacional de vialidad. http://transito.vialidad.gob.ar:8080/web_ns/consultar.jsp

Nuevo Central Argentino S.A. Manual Integral de Vías. Octubre 2014. <https://archivoferroviario.com.ar/manual-integral-de-vias/>

Satélite Ferroviario Red Ferroviaria Argentina https://www.sateliteferroviario.com.ar/horarios/mapa_argentina.htm

ANALYSIS OF RAILWAY TRACES FOR THEIR ADAPTATION TO AN ELECTRICAL SYSTEM WITH BATTERYS IN THE PROVINCE OF ENTRE RIOS

ABSTRACT: In recent years, there has been interest in recovering rail transport by increasing investment. For this reason, from the Laboratorio de Energías Alternativas de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Paraná, it was decided to carry out this study, which aims to analyze the railway traces both in service and out of service that connect Paraná, Entre Ríos – Argentina, with neighboring towns, in order to provide the necessary data for the feasibility and adaptation of the interurban network to a battery-powered electric train system.

For this, a survey and analysis methodology was established through geographic information systems, satellite images and statistical data, identifying and limiting itself to three possible traces: "Paraná-Aranguren", "Diamante-Hasenkamp" and "Paraná-El Pingo". The study made it possible to determine the main variables of the route: stations, level crossings, culverts, bridges, works of art, surface availability, maximum length between charging stations, maximum and minimum slopes, maximum and minimum radii of curvature, design passenger volume, among other data.

Keywords: railway, railway trace, georeference, design variables.

DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO RADIANTE MEDIANTE TUBOS EMBEBIDOS INTEGRADO A UNA ENVOLVENTE EDILICIA

Federico Montenegro², Marcos Hongn^{1,2}, Tomas Concha²

¹ Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Grupo de Edificios Bioclimáticos, CONICET

² Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física, Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina

Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389. Email: mhongn@unsa.edu.ar

RESUMEN: Los sistemas de tubos embebidos con activación térmica (APES) pueden ser acoplados a fuentes/sumideros de baja entalpía para ofrecer reducciones en el consumo de energía, en los picos de demanda eléctrica y en los costos de la energía, asociados al acondicionamiento de edificios, sin resignar los niveles deseados de confort interior. Debido a su naturaleza dinámica y su importante inercia térmica, se requiere la implementación de modelos que representen de manera precisa el comportamiento térmico de estos sistemas. Es por ello, que se implementa un modelo RC denominado “umbrella”, obtenido previamente por los autores, para simular la influencia de un sistema APES integrado a un edificio. Se evalúa el desempeño energético del APES acoplado en los diferentes componentes de la envolvente edilicia con aislación, para el periodo de verano, para un monoambiente emplazado en la ciudad de Salta. Se observa que la inclusión del sistema radiante disminuye significativamente la carga térmica de enfriamiento cuando es integrado sobre los componentes asoleados de la envolvente, en especial el techo, con mayor impacto en la temperatura ambiente interior, con un valor medio en el periodo de verano de 24,9°C para el caso base y 23,5°C para el caso mencionado.

Palabras clave: APES, sistemas radiantes, acondicionamiento bioclimático de edificios, eficiencia energética.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tubos embebidos con activación térmica (APES) han demostrado su potencialidad para incrementar la eficiencia energética en los edificios, lo que ha alentado al desarrollo de diversos trabajos de investigación en este campo, como se refleja en artículos de revisión recientes acerca de los aspectos fundamentales de los APES (Krajcik et al., 2021; Hassan y Abdelaziz, 2020) y los principales desafíos en el control de esta tecnología (Olsthoorn et al. 2017). El potencial de estos sistemas es de especial interés frente a los grandes consumos de energía del sector a nivel mundial. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022) los mayores consumidores de electricidad, en la actualidad, son los sectores de la construcción y la industria, que juntos representan más del 90 % del consumo mundial de electricidad y han contribuido con más del 90 % (alrededor de 5700 TWh) al crecimiento de la demanda mundial de electricidad desde 2010. En los edificios, la energía eléctrica se consume principalmente por el uso de electrodomésticos (45%) y por refrigeración y calefacción de espacios (aproximadamente el 30%). En consecuencia, la situación actual demanda la implementación de tecnologías que promueva la eficiencia energética en el ambiente construido y que colaboren al incremento de la contribución de energías renovables, requerimientos que los APES pueden satisfacer completamente.

Los sistemas APES consisten de tubos embebidos en la estructura del edificio, generalmente en la envolvente, tal como pisos, techos de losa o paredes. Estos tubos intercambian calor directamente con la masa térmica del edificio, calor que luego es intercambiado con el espacio interior. Primero, esta interacción con la inercia térmica es útil para almacenar calor, lo que ayuda a amortiguar las fluctuaciones de temperatura interior causadas por ganancias internas y/o condiciones climáticas exteriores. En segundo lugar, los APES pueden utilizar las grandes superficies del edificio para intercambiar calor con los espacios interiores, lo que permite lograr una transferencia de calor significativa mediante gradientes bajos de temperatura (Lehmann et al., 2007). En consecuencia, estos sistemas se pueden utilizar para calefacción a baja temperatura y refrigeración a alta temperatura, lo que mejora la eficiencia en los procesos de climatización y permite la integración de fuentes de energía renovables como ser: enfriamiento nocturno, intercambiadores calor geotérmico GHE (Romaní et al., 2018), etc. Finalmente, la naturaleza del intercambio de calor con los ocupantes, principalmente radiativa, permite lograr mejores condiciones de confort interior regulando adecuadamente la temperatura radiante media y, por lo tanto, en un rango conveniente de temperatura operativa (Henze et al., 2008). Estas características dan lugar al requerimiento de modelos térmicos dinámicos de precisión para estudiar el comportamiento termodinámico de los APES, mediante simulación, permitiendo evaluar el impacto de su integración en los edificios y las condiciones de operación y control adecuadas.

Para modelar la contribución y efecto de los APES como sistemas constructivos integrados en los edificios es importante considerar que estos sistemas actúan para modificar el ambiente térmico del espacio interior, pero lo hacen alterando la temperatura de las superficies en lugar de simplemente cambiar las condiciones del aire que se suministra al espacio. Por lo tanto, un modelo integral debe tener en cuenta los cambios en la superficie o superficies que resultan de agregar o quitar calor de las mismas, mientras también modela la transferencia de calor dinámica que tiene lugar en el resto del espacio y/o edificio (Strand, 2022). En este sentido fue desarrollado un modelo numérico integral para simular la transferencia de calor conjugada transitoria en la envolvente de un edificio con APES (Shen y Li, 2016). Este estudio se focalizó en la evaluación energética en la temporada de verano, de manera comparativa, sobre diferentes escenarios climáticos (tres ciudades de China) y para el sistema APES ubicado en diferentes componentes de la envolvente. Una de las conclusiones interesantes es que el sistema APES puede proporcionar una mayor reducción en la carga térmica en los lados soleados del edificio, por ejemplo, la reducción de la carga de enfriamiento con el sistema integrado en la pared oeste es de 17,4 kWh/m² en Beijing (verano).

Por otro lado, el desarrollo de modelos simplificados con la suficiente precisión para predecir el rendimiento térmico de los sistemas APES es relevante para el campo de la simulación energética de edificios, siendo las redes térmicas de resistencias (R) y capacitancias (C) una de las representaciones más adecuadas para predecir el rendimiento térmico del APES (Zhu et al., 2014).

Se ha venido trabajado en la generación de un modelo térmico RC con parámetros optimizados mediante técnicas de algoritmos genéticos, denominado modelo “umbrella” (Hongn et al., 2022) capaz de modelar con gran precisión el núcleo de concreto donde se embeben los tubos. En un trabajo posterior, han propuesto la consideración de la transferencia de calor en dirección axial del tubo (embebido) a través de un método estacionario denominado ϵ -NTU (Hongn et al., 2023), obteniendo finalmente un modelo semi-dinámico RC que ha demostrado un desempeño destacado.

En el presente trabajo, se analiza el impacto e influencia, desde el punto de vista termo-energético, de la integración de elementos constructivos APES, como sistema de enfriamiento, en diferentes componentes de la envolvente de una tipología constructiva tipo mono ambiente, para las condiciones meteorológicas de verano de un año típico de la ciudad de Salta.

METODOLOGÍA

Modelación de los elementos constructivos

Para determinar el comportamiento termo-energético integral de un edificio con un sistema APES acoplado debe utilizarse un programa de simulación global de edificios como Energy Plus o TRNSYS,

o en su defecto, modelar mediante código computacional los intercambios de calor entre los distintos elementos que interactúan térmicamente con el aire interior. Así, en este trabajo, se generó un modelo integral mediante el entorno de programación Python. El mismo, se basa en la analogía de resistencias y capacitores eléctricos, modelo RC en una dimensión, para definir la interacción térmica entre los elementos constructivos que componen el edificio.

A continuación, se define el modelado de tres tipos de elementos constructivos:

Elementos masivos: sistemas o capas constructivas que tienen la capacidad de acumular calor, por lo que se considera el efecto de conducción y acumulación térmica en el material. Fig. 1a.

Elementos no masivos: sistemas o capas constructivas que tienen una capacidad de acumulación de calor despreciable por lo que sólo se considera el efecto conductivo a través del material. Ej: vidrios, capas de aislación. Fig. 1b.

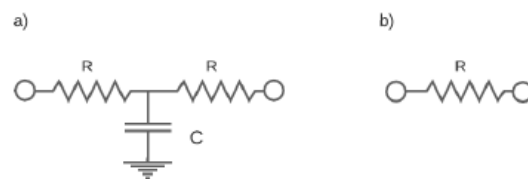
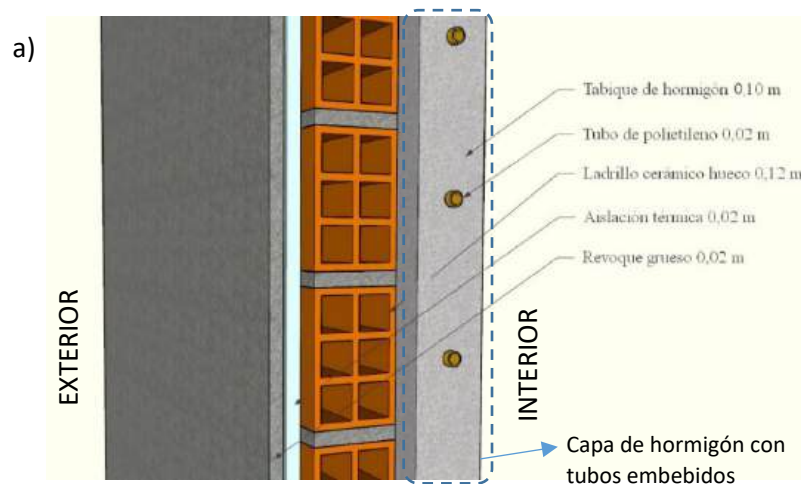


Figura 1: Modelado de elementos o capas constructivas comunes: a) 2RIC para masivos, b) 1R para no masivos.

Núcleo de Hormigón del APES: Este sistema tiene una modelación especial, estudiada en profundidad en trabajos anteriores donde se ha obtenido un modelo semi-dinámico que mostró un desempeño muy aceptable (Hongn et al., 2023). El tabique de hormigón contiene una fuente/sumidero de calor representada por los tubos embebidos en el mismo. Este tabique puede acoplarse a otras capas constructivas para formar un sistema constructivo heterogéneo con capacidad de absorber o liberar calor mediante la activación del sistema, lo que se conoce sistema APES, Fig. 2.



b)

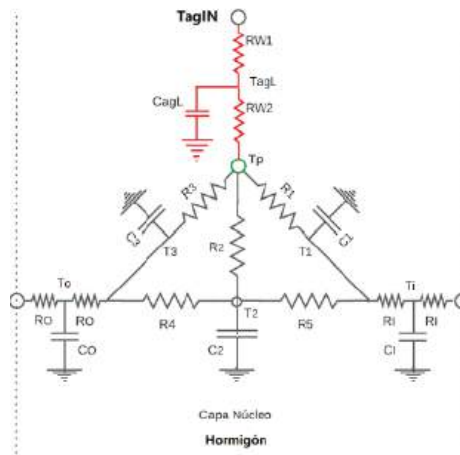


Figura 2: a) Sistema APES integrado en la envolvente vertical, b) modelo RC “umbrella” para el tabique de hormigón (núcleo) de un sistema APES. (Hongn et al., 2023).

Los parámetros RC de la capa principal, la de hormigón de 0,10 m, han sido ajustados mediante una metodología de optimización de parámetros, a partir de un modelo numérico de diferencias finitas 2D en el dominio de la frecuencia, y se han obtenido los valores indicados en la Tabla 2.

Tabla 1: Parámetros RC calibrados para la capa principal del sistema APES.

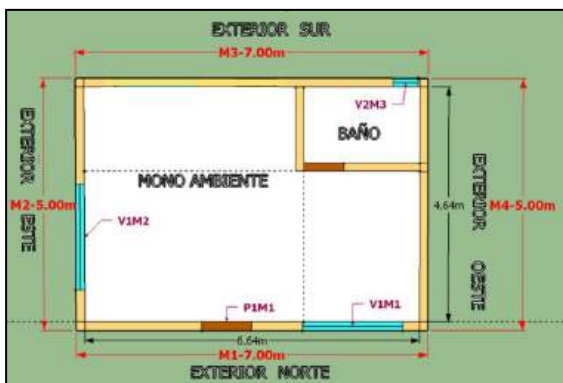
$R(m^2K/W)$							$C(J/m^2K)$				
R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_o	R_i	C_1	C_2	C_3	C_o	C_i
0.4439	0.0458	0.4439	0.0240	0.0240	0.0153	0.0153	17052	53742	17052	57081	57081

Caso de estudio

Se trabaja con el archivo meteorológico *Energy Plus Weather* (epw), obtenido del repositorio *OneBuilding*, para la ciudad de Salta (aeropuerto). De este archivo anual, se extraen las siguientes variables: temperatura de bulbo seco, humedad relativa, irradiancia sobre plano horizontal y velocidad de viento.

Para realizar el estudio, se tomó como caso base una vivienda de tipología monoambiente, como lo indica la Fig. 3.

a)



b)

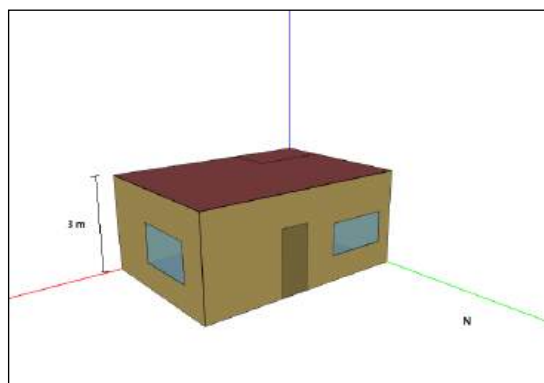


Figura 3: Sistema constructivo estudiado, monoambiente, a) vista en planta y b) vista 3D.

La vivienda en estudio consiste de un solo ambiente más el baño, con orientación norte y una planta de 35 m² (7 m de ancho y 5 m de largo) y altura libre igual a 3 m. Para las paredes, se considera ladrillo hueco de 0,12 m con revoque de ambos lados. El techo es de losa (liviana) de 0,26 m de espesor. Por su parte, el piso se compone por una capa de hormigón (contrapiso) de 0,1 m y aislación térmica de 0,04

m. La envolvente cuenta con tres ventanas de vidrio simple (0,003 m de espesor) ubicadas sobre pared este, norte y sur (baño), la primera de 1 m x 1,5 m, la segunda de 1 m x 1 m y la última de 0,4 m x 0,2 m. Se considera la presencia de cortinas en las ventanas del ambiente principal, lo que disminuye el coeficiente de transmitancia solar de las mismas. Todas las superficies presentan una capa de aislación térmica de 0,02 m del lado exterior. Estas características definen el caso base del edificio estudiado.

Consideraciones para la simulación

La simulación térmica se realizó considerando una zona térmica, sin ganancias de calor internas y renovaciones constantes de aire por hora. Se asumieron las siguientes condiciones:

- Transferencia de calor unidimensional en paredes.
- La transferencia de masa (humedad) no se considera en los cálculos.
- Las paredes y techo están expuestos a la radiación solar. Se utilizó un coeficiente de absorción solar de paredes y techo de 0,5.
- Las superficies exteriores, techo y paredes, están expuestas al viento y a la radiación solar. Para la determinación del intercambio de calor entre las superficies y el ambiente exterior se utiliza el concepto de Temperatura sol-aire.
- Coeficientes fijos de transferencia de calor convectivos/radiativos h : 6 y 12 W/m²-K para paredes lado interior y exterior respectivamente, 8,5 y 12 W/m²-K para el elemento con APES (paredes) lado interior y exterior respectivamente y, 10,5 (interior) y 12 W/m²-K (exterior) para el caso del APES en techo. Además, Se consideraron 4 renovaciones de aire por hora (RAH) para toda la simulación.
- Para considerar la transferencia de calor conductiva con el suelo, el elemento “piso” posee una capa extra, definido como tierra (1 m de espesor) conectado a un nodo de temperatura constante (21 °C).
- Se considera que el agua, al salir del sistema APES, se enfría en un sumidero térmico tipo intercambiador geotérmico, por lo que la temperatura del agua decrece hasta la temperatura del suelo a una profundidad de 1,5 m, considerada como la media estival exterior de 21°C.
- Algoritmo de cálculo EDO (ecuaciones diferenciales ordinarias), compatible con la modelación RC.

La metodología plasmada en el código generado en Python sigue los siguientes pasos generales:

1. Definición de condiciones iniciales o inputs: Datos meteorológicos de archivo epw, cálculo de temperatura sol-aire para todas las superficies de la envolvente, temperaturas iniciales (semilla) para los nodos de temperatura de la red térmica.
2. Resolución en simultáneo de las ecuaciones de transferencia de calor para cada elemento o nodo del sistema. Se resuelve el sistema de ecuaciones, mediante la librería ODEINT de Scipy, cuyo nodo central es el del aire interior (única zona térmica) correspondiente a la siguiente ecuación de balance de energía:

$$\rho C_p V \frac{dT_{aire,in}}{dt} = Q_{paredes} + Q_{ventanas} + Q_{piso} + Q_{techo} + Q_{solar} + Q_{infil} + Q_{APES} \quad (1)$$

ρ : Densidad del aire, kg/m³

C_p : Calor específico del aire, kJ/kg°C

V : Volumen del aire en el espacio interior, m³

Donde $Q_{paredes}$, $Q_{ventanas}$, Q_{piso} y Q_{techo} es el calor (W) intercambiado mediante los componentes de la envolvente, que a su vez interactúan térmicamente con el exterior. Q_{solar} es la ganancia solar a través de las superficies vidriadas (considerando la presencia de la cortina), Q_{infil} es la tasa de energía intercambiada mediante las infiltraciones de aire y Q_{APES} es el calor intercambiado mediante el sistema APES, cuya formulación se encuentra en el trabajo previo ya mencionado.

3. Obtención de series (conjunto de datos de salida como temperaturas y tasas de flujo de calor) para cada paso temporal de 1 h.
4. Generación de archivos y post procesamiento de datos: cálculo de temperatura operativa y confort térmico.

RESULTADOS

Análisis dinámico de transferencia de calor

La Fig. 4 (a) muestra el flujo de calor en la superficie interna la pared orientada al oeste, donde se observa el efecto de enfriamiento del sistema, la temperatura de esta superficie cae en promedio alrededor de $2,5^{\circ}\text{C}$ entre el caso base y el caso considerado, lo que indica que la temperatura radiante media (MRT) es menor. Por tanto, los tubos integrados en este elemento pueden no solo reducir la carga de refrigeración, sino también mejorar el confort térmico. Como se muestra en la Fig. 4 (b), el flujo de calor interno se reduce notablemente durante todo el periodo de verano ya que la mayor parte del tiempo el sistema APES absorbe calor del interior del monoambiente. Debido al efecto dinámico de almacenamiento térmico de los materiales, hay momentos (de corta duración y frecuencia) en donde el sistema radiante aporta calor hacia el interior. En este contexto, en promedio para el periodo de verano, la pared sin APES aporta 3.74 W/m^2 mientras que para un sistema radiante sucede lo contrario, removiendo en promedio para el mismo periodo un -9.43 W/m^2 (el negativo indica calor absorbido por el lado interior de la superficie, extraído del ambiente interno).

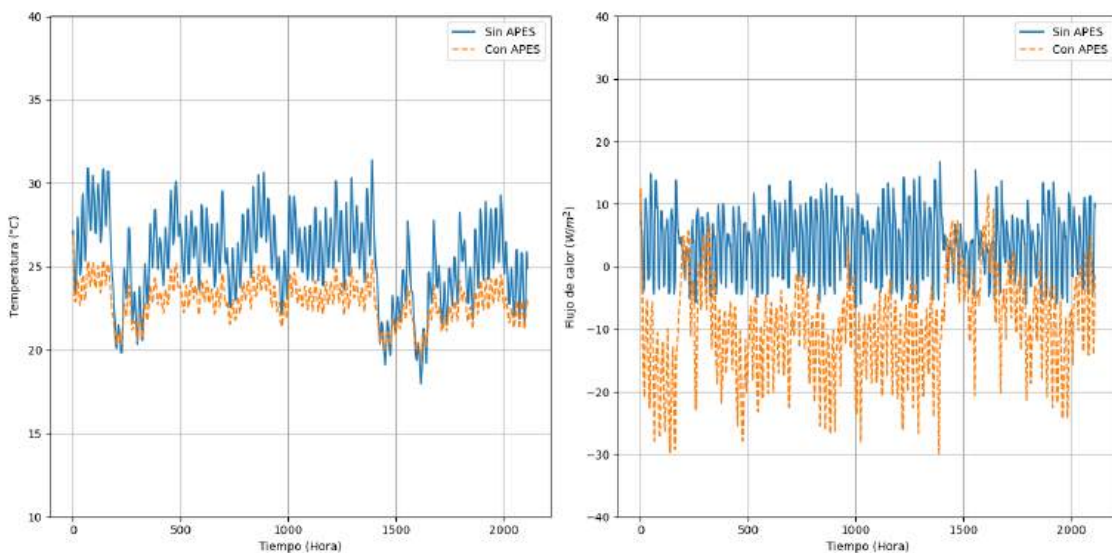


Figura 4: Pared oeste con/sin APES integrado, a) temperaturas superficiales interiores y b) flujo de calor superficial interior.

Efecto de las orientaciones

El rendimiento del sistema radiante aplicado a diferentes orientaciones, en la ciudad de Salta Capital, se muestra en Fig. 5. Cada orientación mencionada implica integrar ese elemento particular con el sistema APES, manteniendo las superficies restantes sin cambios (versión original o base). Así, el calor cedido/removido al/desde el espacio interior se ve significativamente afectado por la incidencia de radiación solar.

A partir del agua circulando por los tubos embebidos en el elemento constructivo, la transferencia de calor externa se reduce notablemente y la ganancia de calor en las envolventes integradas con APES en cada condición es negativa, lo que significa que la superficie eliminará el calor del espacio interior y no lo contrario.

Además, al comparar el flujo de calor del techo (horizontal) este pasa de aportar más calor, en el caso base con una cantidad de calor aportado de $12,9 \text{ MJ/m}^2$ para todo el periodo, a remover unos $5,3 \text{ MJ/m}^2$ en el caso con APES integrado sobre la cubierta (menor absorción que los otros escenarios). La diferencia en la cantidad de calor absorbido entre las orientaciones verticales se hace más pequeña, lo que significa que la capacidad de remoción de calores influenciada por el entorno exterior en menor medida. La situación es más favorable para el caso con el APES del lado soleado; por ejemplo, la reducción de calor en el lado oeste es un 10% mayor que en el lado sur. Esto se puede interpretar además de la magnitud y dirección de las barras en el gráfico de la Fig. 5.

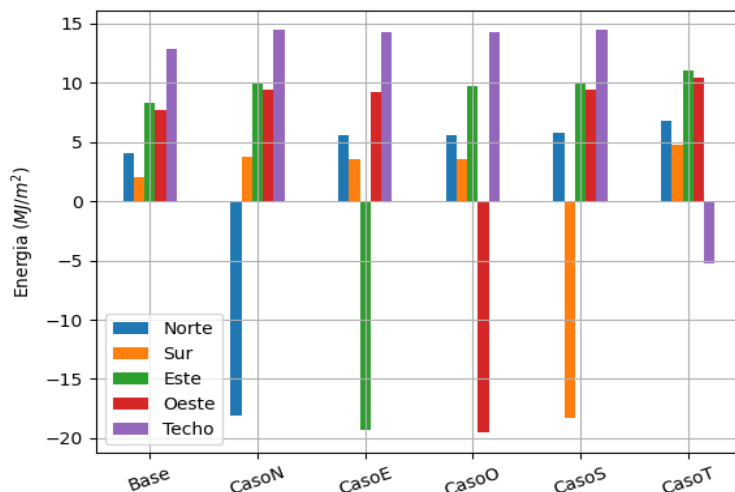


Figura 5: Energía (promedio para el periodo de verano) absorbida/cedida al ambiente interior por las envolventes sin APES y con APES, integrado en sólo una componente de la envolvente por caso analizado.

Como se puede observar en el Fig. 6, que muestra un diagrama de caja y bigotes, el efecto de la integración del APES al techo es significativo para reducir la temperatura ambiente interior promedio durante el verano. La configuración que presenta el mejor desempeño corresponde al caso donde el APES se integra al techo, ya que las temperaturas mínimas, máximas y medias se desplazan hacia abajo en el gráfico, acercándose al rango de temperaturas de confort térmico.

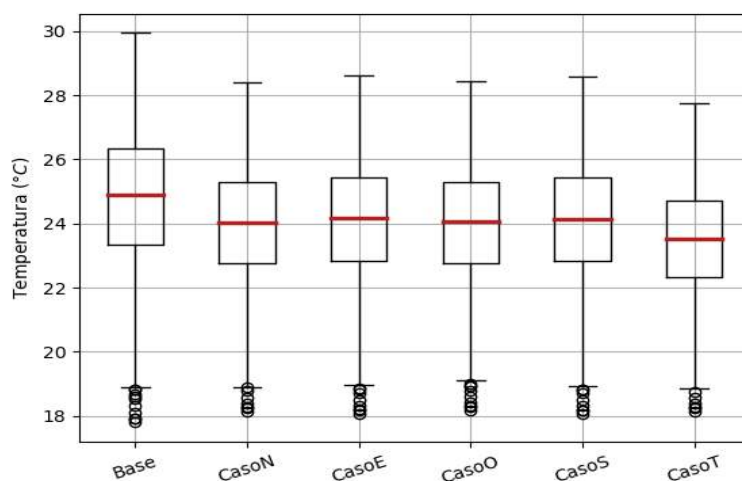


Figura 6: Gráfico de cajas y bigotes para las temperaturas del ambiente interior, para los distintos casos analizados.

Análisis de confort térmico

El criterio de ASHRAE Standard 55, para determinar el nivel de confort, se basa en el modelo PMV (Voto Medio Predicho) y PPD (Porcentaje de personas en insatisfacción). Se establecen rangos según los valores de PMV, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores definidos para PMV según ASHRAE 55.

+3	Caliente
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutral
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

El PMV es una medida que indica el grado de satisfacción de las personas con la temperatura ambiental. Este se calcula a partir de variables como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la actividad metabólica de las personas. Mientras que el PPD se refiere a la proporción de individuos que se sienten incómodos o molestos por el calor o el frío. Este porcentaje puede variar según diversos factores, como el clima, la estación, la actividad física, la vestimenta, la humedad y la ventilación.

Para mostrar de manera más clara el efecto del sistema radiante propuesto sobre el confort térmico, se compara el monoambiente con sus envolventes sin aislación, caso 0, para luego contrastarla con los otros casos ya analizados (base y mejor caso). De esta forma, se puede apreciar cómo el sistema radiante mejora las condiciones térmicas de la vivienda, reduciendo la demanda energética y aumentando el bienestar de los ocupantes. Para ello se analiza la primera semana de nuestros datos. Mediante el uso de la librería *pythermalcomfort*, se calculan los índices de confort térmico.

Como se puede ver en la Fig. 7, el caso sin aislación térmica, presenta valores de PMV elevados desde el mediodía hasta la noche para la semana, lo que indica que hay una sensación térmica de calor y un nivel de incomodidad alto. El porcentaje de personas insatisfechas varía entre el 20% y el 80%, lo que significa que la mayoría de los ocupantes no se sienten confortables con las condiciones ambientales.

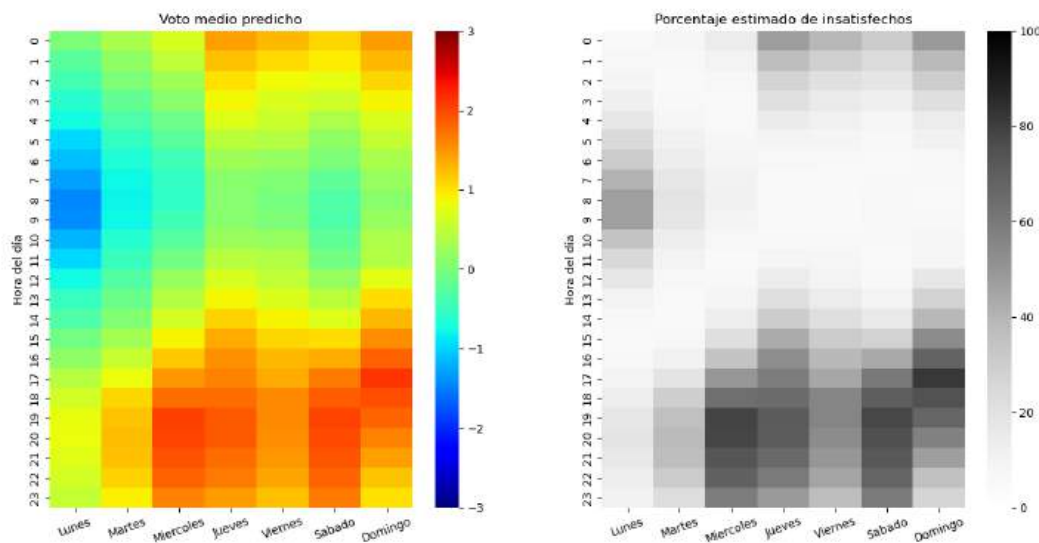


Figura 7: PMV y PPD para el caso 0 (envolvente sin aislación y sin APES).

La aislación térmica (caso base) tiene un efecto significativo en el confort térmico de los ocupantes, según se muestra en los indicadores PMV y PPD. Al analizar el caso base con aislación, Fig. 8, se aprecia que los valores de PMV y PPD disminuyen notablemente, lo que implica una menor sensación de incomodidad térmica. Sin embargo, se observa que, a partir del miércoles, el PPD fluctúa entre el 20% y el 40%, lo que indica que hay un rango de variabilidad en la percepción térmica de las personas.

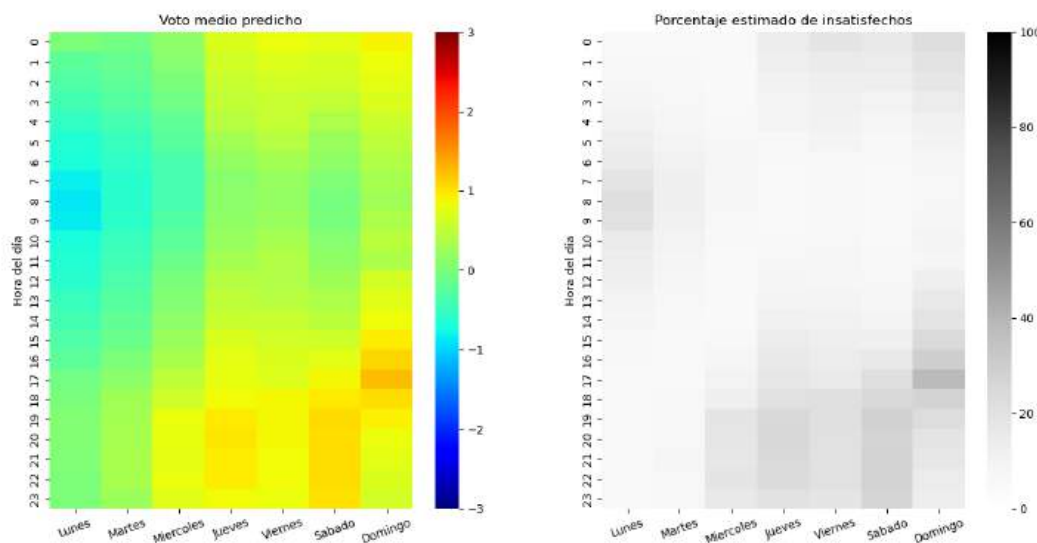


Figura 8: PMV y PPD para el caso base (envolvente aislada y sin APES).

En el último caso, Fig. 9, se considera que todas las paredes tienen aislamiento térmico y el techo con sistema APES. El PPD no supera el 20% en este escenario. Esto significa que la mayoría de las personas se sentirían cómodas con la temperatura interior.

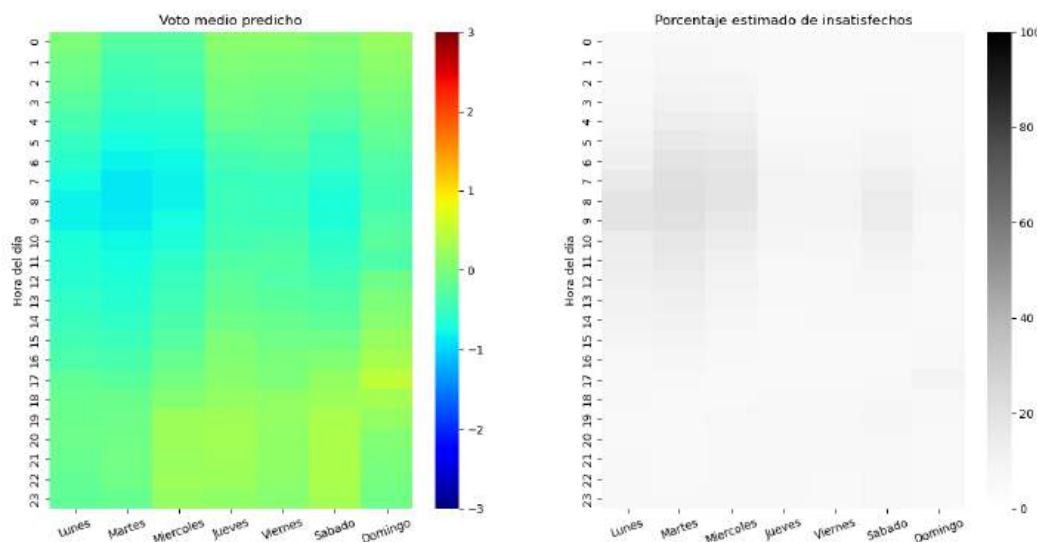


Figura 9: PMV y PPD para el caso modificado, con el sistema APES integrado en techo.

CONCLUSIONES

La estructura de red térmica RC propuesta para el sistema APES, el componente de mayor complejidad en la modelación RC, ha comprobado reflejar de manera fiable el comportamiento térmico del mismo (Hongn et al., 2023). A partir de este modelo, se generó el sistema de ecuaciones para considerar las interacciones térmicas entre los componentes de un edificio completo y el aire interior de la zona térmica

(nodo principal en una red térmica global), integrando el sistema radiante APES en los elementos de la envolvente. El aporte del APES se ve reflejado en la reducción de las cargas térmicas de enfriamiento.

En base a los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

(1) Mediante la integración de los sistemas APES, la temperatura de la envolvente edilicia disminuye y la mayor parte de la radiación solar puede ser absorbida por el agua de refrigeración circulando mediante el sistema radiante, en lugar de transferirse a la habitación. Por lo tanto, la carga de refrigeración real se reduce durante los días de verano, casi en la totalidad del periodo.

(2) La disminución en las temperaturas superficiales interiores de las envolventes, influye en la mejora del confort térmico al reducir TMR y por ende la temperatura operativa.

Como trabajo futuro, se analizará el comportamiento termo-energético de estos sistemas radiantes de climatización para diferentes tipologías constructivas, bajo diferentes condiciones climáticas y se ahondará en el estudio del intercambiador de calor geotérmico, fundamental como sumidero térmico, desde la simulación y experimentación.

REFERENCIAS

Hassan, M. A. y Abdelaziz, O. (2020). Best practices and recent advances in hydronic radiant cooling systems – Part II: Simulation, control, and integration. *Energy and Buildings*, 224, 110263.

Henze, G.P., Felsmann, C., Kalz, D.E., Herkel, S. (2008). Primary energy and comfort performance of ventilation assisted thermo-active building systems in continental climates. *Energy & Buildings* 40, 99-111.

Hongn, M., Bre, F., Valdez, M., y Flores Larsen, S. (2022). Two novel resistance-capacitance network models to predict the dynamic thermal behavior of active pipe-embedded structures in buildings. *Journal of Building Engineering*, 47, 103821.

Hongn, M., Montenegro, F., Gea Salim, C., González, S. (2023). Modelo semi-dinámico para la determinación del comportamiento térmico de sistemas radiantes de tubos embebidos. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 50, 13-21.

International Energy Agency IEA (2021). *World Energy Outlook 2022*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

Krajčičk, M., Arıcı, M., Šikula, O. y Šimko M. (2021). Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers. *Energy & Buildings* 253, 111476.

Lehmann, B., Dorer, V., y Koschenz, M. (2007). Application range of thermally activated building systems TABS. *Energy & Buildings* 39, 593-598.

Romaní J., Belusko M., Alemu A., Cabeza L., de Gracia A., Bruno F. Control concepts of a radiant wall working as thermal energy storage for peak load shifting of a heat pump coupled to a PV array. *Renewable Energy* 118 (2018), 489-501.

Shen, C. y Li, X. (2016). Dynamic thermal performance of pipe-embedded building envelope utilizing evaporative cooling water in the cooling season. *Applied Thermal Engineering* 106, 1103-1113.

Strand, R. K. (2022). Recent energy simulation model enhancements for radiant systems. *Energy & Buildings* 268, 112237.

Zhu, Q., Xu, X., Wang, J. y Xiao F. (2014). Development of dynamic simplified thermal models of active pipe-embedded building envelopes using genetic algorithm. *International Journal of Thermal Sciences* 76, 258-272.

THERMAL PERFORMANCE OF COOLING RADIANT SYSTEM WITH EMBEDDED PIPES INTEGRATED INTO A BUILDING ENVELOPE A BUILDING ENVELOPE

ABSTRACT: Thermally Activated Embedded Tube Systems (APES) can be coupled to low enthalpy sources/sinks to reduce energy consumption, electrical demand peaks, and energy costs associated with building retrofits without resigning the desired levels of interior comfort. Due to its dynamic nature and significant thermal inertia, the implementation of models that accurately represent the thermal behavior of these systems is required. For this reason, a RC model called "umbrella" is implemented, previously obtained by the authors, to simulate the influence of an APES system integrated into a building. The energy performance of the APES coupled with the different components of the building envelope with insulation is evaluated for a studio apartment in Salta for the summer period. It is observed that the inclusion of the radiant system significantly reduces the thermal cooling load when it is integrated into the sunny components of the envelope, especially the roof, with a more significant impact on the interior ambient temperature, with an average value in the summer period of 24.9°C for the base case and 23.5°C for the mentioned case.

Keywords: APES, radiant systems, bioclimatic conditioning of buildings, energy efficiency.

IMPACTO AMBIENTAL DE SOL Y VIENTO EN ESPACIOS URBANOS: ESTUDIO Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO AL ENTORNO DE EDIFICIOS EN ALTURA

Silvia de Schiller y John Martin Evans

Maestría en Sustentabilidad en Arquitectura y Urbanismo, Secretaría de Posgrado
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires

Tel. +11 47919310 – e-mail: sdeschiller@gmail.com

RESUMEN: Este trabajo presenta estudios de evaluación del impacto de sol y viento en espacios urbanos alrededor de edificios en altura y en su entorno, realizados en respuesta a objeciones presentadas en una audiencia pública de CABA en un Estudio de Impacto Ambiental. A tal fin, se analizaron las condiciones aceptables en espacios urbanos, habiéndose determinado el régimen de sol, impacto de sombras, reflejos molestos y modificación del viento en la zona en estudio. En ese marco, se realizaron simulaciones del impacto de sol y viento complementariamente con programas de simulación numérica y maquetas físicas en el heliodón, simulador del impacto de sol, y en el túnel de viento. Se compararon las condiciones ambientales aceptables con las condiciones antes y después de construir el nuevo proyecto y se analizaron los resultados, proponiendo recomendaciones para estudios de impacto ambiental de edificación en altura en entornos urbanos.

Palabras claves: Impacto ambiental, viento, sol, edificación en altura, código de ordenamiento urbano.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los estudios de Evaluación de Impacto Ambiental, EIA, introducidos en Estados Unidos en 1969, tuvo por objetivo detectar, evaluar y mitigar las posibles consecuencias de grandes proyectos de infraestructura como represas y autopistas (USC, 1969). Posteriormente, se realizaron en Europa a través del Directivo de Evaluación del Impacto Ambiental (EU, 1985). En Argentina, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable establece las condiciones y la metodología para los EIA (SAyDS, 2019). Finalmente, el Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires estableció la obligación de realizar la EIA de grandes proyectos urbanos (GCABA, 2020).

Dado que los estudios de Evaluación de Impacto Ambiental tienen por objetivo establecer posibles consecuencias de emprendimientos edilicios, analizar el grado de aceptabilidad, evaluar alternativas, identificar medidas de mitigación y presentar conclusiones, son generalmente desarrollados por el promotor o proponente, con la evaluación por un auditor, y difusión de los resultados según la Resolución 339 de SAyDS.

Cabe notar que en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires se realizan audiencias públicas para proyectos urbanos, y en ese marco, los EIA abarcan los posibles impactos en la etapa de construcción, uso y eventual demolición. Sin embargo, los estudios convencionales de evaluación de proyectos urbanos no incluyen las modificaciones ambientales que producen los flujos y aceleraciones de viento ni el impacto de reflejos o la proyección de sombras, limitando el acceso al sol y la disponibilidad del recurso natural para la implementación de sistemas solares en el entorno urbano del proyecto propuesto.

En este marco, el presente trabajo surge como resultado de la audiencia pública de un proyecto que proponía la construcción de tres torres de 100 m de altura en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. En esa audiencia, algunos oponentes al proyecto comentaban su preocupación sobre posibles impactos de

sombras, la intensificación de la Isla Urbana de Calor, IUC, y aceleraciones de viento. Como resultado, se realizaron estudios de las modificaciones de sol y sombras, velocidad de viento y reflejos molestos.

Los estudios analizaron los impactos potenciales del proyecto en su entorno, tales como: espacios de circulación vehicular, peatonal y de bicicletas, espacios abiertos y posibles impactos en fachadas de edificios y sectores particulares de propiedades en la zona de influencia del proyecto.

Observaciones y respuestas a la Audiencia Pública, CABA.

El Plan Urbano Ambiental, en su Artículo 25, prevé la realización de audiencias públicas con el fin de promover la participación social en la evaluación de proyectos urbanos. Por su envergadura y ubicación estratégica, el proyecto planteado requiere un estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, su presentación y discusión en una Audiencia Pública, la que se realizó el 15 de marzo de 2022, contando con amplias posibilidades de participación. A tal fin, cabe mencionar que la evaluación de los aspectos considerados, registrados por la Agencia de Protección Ambiental, APA, de CABA, incluye:

- Por “la fragmentación del Estudio de Impacto Ambiental en dos manzanas, se observa que no se realizó una evaluación integral de los impactos ambientales acumulados que incluyan al emprendimiento en su conjunto”.
- “... se observa el impacto por radiación solar que generarán las fachadas de vidrio como las sombras que creará el proyecto sobre todo su entorno”. Indicando textualmente: “... no analiza el impacto ambiental por radiación solar ni por isla de calor”.
- “... no se mencionan las sombras que este proyecto generará a las miles de viviendas que hay en el entorno y, como se demuestra en los gráficos que se adjuntan, quitando la condición vital que nos garantiza el Plan Urbano Ambiental”.
- “No hay análisis de la aceleración de los vientos y, además de lo expresado por la oradora anterior, decimos que, por un lado, tenemos la aceleración de los vientos a nivel de calle, pero hay un segundo efecto que se genera cuando se trata de varias torres, el conocido “Efecto Ventury” (sic) o “canalización”; se trata de una aceleración del viento que sucede cuando éste tiene que pasar por un espacio estrecho...”.
- “... al margen de la impermeabilización del suelo y la remoción de árboles, en este estudio no se analiza la inercia térmica que generarán los materiales con los que se construirán los edificios”.

Los comentarios e inquietudes presentados en esa audiencia pública demuestran la preocupación de posibles impactos ambientales del proyecto que no fueron incluidos en el informe de EIA. Se considera acertado el comentario sobre la necesidad de contemplar la interacción con otros proyectos previstos, aunque no están totalmente definidas. Sin embargo, los comentarios no presentan los fundamentos técnicos desarrollados. Como resultado, se realizaron estudios sobre la proyección de sombras, tanto para la evaluación de horas de sol recibidas en invierno como la reducción de la radiación solar, la modificación del régimen de viento y la proyección de reflejos molestos en fachadas vidriadas. El estudio de EIA no incluye los impactos ambientales en el mismo proyecto, tales como aceleración de viento por el ‘efecto de embudo’ entre las torres o el cumplimiento de las normas de asoleamiento. Estos aspectos corresponden a la evaluación del proyecto y el cumplimiento del Código Urbanístico (GCABA, 2019) que permita obtener el permiso municipal para la construcción, un trámite independiente de EIA.

METODOLOGÍA

La metodología adoptada contempla las siguientes etapas:

Etapas 1. Análisis de las condiciones ambientales: en la zona en estudio, la edificación existente, las condiciones climáticas y solarimétricas. Para ello, se utilizaron los datos del Servicio Meteorológico Nacional correspondiente a Aeroparque, a menos de 5 km del proyecto, considerando la topografía y uso de suelo. Los datos climáticos provienen de fuentes oficiales, nacionales e internacionales (SMN 1992, 1996, 2022), (Gustfront, 2015), archivos climáticos de Energy Plus (EPW, 2018), datos de radiación solar (Grossi Gallegos y Reghini, 2007; Banco Mundial, 2022, NASA, 2022).

- Para establecer los requisitos, se evaluaron las condiciones ambientales aceptables utilizando los criterios de las Normas de Asoleamiento (IRAM, 2012), el Código Urbanístico de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (GCABA, 2019) y se analizó la reducción anual de rendimiento en posibles módulos

fotovoltaicos en los techos de edificios de la zona de influencia debido a la proyección de sombras. Ello se expresa en un valor económico producido por la disminución de kilowatt-horas anuales, y como porcentaje, considerando la implementación de generación distribuida (Secretaría de Energía, 2020).

- Para el impacto de viento se evaluó el aumento de la velocidad de viento en zonas sensibles, tales como bicisendas, veredas y cruces peatonales, considerando la escala del Servicio Meteorológico Nacional de Altas 2022) y la potencial reducción de sensación térmica en invierno según la escala del Servicio Meteorológico Nacional.

- Otro aspecto evaluado fue el potencial impacto de reflejos de vidrios. Este aspecto fue analizado en estudios anteriores y surge de las observaciones en el terreno donde una serie de torres tienen grandes superficies de vidrios reflejantes. Se consideraron criterios de confort visual establecidos en el manual de la Asociación Argentina de Luminotécnica (AADL, 2001). Sin embargo, en Argentina no se cuenta con normas que controlen reflejos molestos y potencialmente peligrosos en la vía pública. La normas de evaluación de deslumbramiento refiere principalmente a la iluminación artificial, en el interior de oficinas y el alumbrado público en espacios exteriores.

Etapas 2. Simulación física-espacial: incluye simulación de sol y viento con maquetas en el Laboratorio de Estudios Bioambiental (Evans, 2000, Evans, 2004) usando el Heliodon, simulador del movimiento aparente del sol (Cheung, 2000) y el túnel de viento de baja velocidad con gradiente de velocidad de viento en altura. Se utilizaron maquetas físicas en distintas escalas, una maqueta de la zona de influencia en escala 1:750 con detalles de 15 manzanas fue producido con una impresora 3D. Otra maqueta inicial en 1:1000 permitió determinar la extensión de la zona, mientras la maqueta en escala 1:250 fue producida para los estudios de viento en espacios urbanos alrededor del proyecto.

Etapas 3. de estudios de proyección de reflejos: en este estudio se utilizaron espejos en las fachadas del proyecto para visualizar las zonas afectadas e identificar las horas del día y meses del año con potenciales problemas (Evans y de Schiller, 1997). Un estudio complementario utilizó simulación numérica para confirmar zonas afectadas y la duración de molestias visuales. En este caso, no presenta superficies convexas que generen problemas de concentración de reflejos (Danks & Good, 2016).



Figura 1. Maqueta física de la zona de influencia en el heliodon, escala 1:175.

Etapas 4. Simulación numérica: se realizaron estudios de impacto de sol y de viento, con una maqueta virtual y una serie de aplicaciones incluidas en Herramientas Ladybug, Honeybee con Grasshopper, (Ladybug Tools, 2023), disponibles sin cargo. Las herramientas incluyen: 1. evaluación de la distribución de radiación solar anual en superficies urbanas y las horas de sol sobre fachadas, según la

volumetría del entorno urbano, 2. simulación virtual del régimen de viento con el programa CFD, Computational Fluid Dynamics, y 3. identificación de zonas potencialmente peligrosas por la proyección de reflejos de sol en edificios del entorno.

Etapas 5. Final: se compararon las condiciones ambientales simuladas por ambos métodos, simulación con maquetas físicas y simulación numérica, y las condiciones aceptables que cumplen con las normas. El informe presenta posibles medidas de eliminación o mitigación en casos con importantes impactos.

EVALUACIÓN DE ASOLEAMIENTO

Las normas y recomendaciones de IRAM (2012), Secretaría de Vivienda (2019) y el Código Urbanístico (GCABA, 2019) establecen el nivel mínimo de asoleamiento de 2 horas de sol en invierno. La Figura 2 indica la zona donde las torres del proyecto no permiten contar con las 2 horas requeridas, y abarca una zona muy limitada que afecta a dos o tres edificios, solamente uno es un edificio de vivienda colectiva.

El Código Urbanístico permite edificios en avenidas principales con una altura que tampoco logra cumplir con las exigencias del propio código. Además, existe otra situación de conflicto donde los edificios del entorno, si bien permiten cumplir con las 2 horas en invierno, la sombra proyectada por las nuevas torres, con solamente 1 hora de sombra y sumado a las sombras preexistentes, afecta el cumplimiento de la Norma. En la Figura 4 se indica la proyección de sombras y horas de sol con simulación numérica: las zonas negras y en grises oscuros no llegan a contar con 2 horas de sol en la situación actual sin el proyecto, mientras las zonas en amarillo y rojo tienen un mínimo de 0 horas y menos de 2 horas de sol después de construir el proyecto, identificando las zonas potencialmente perjudicadas. En este caso, cabe aclarar que la mayoría de las superficies que logran menos de 2 horas de sol después de construir el proyecto corresponden a techos o medianeras que no lo requieren.

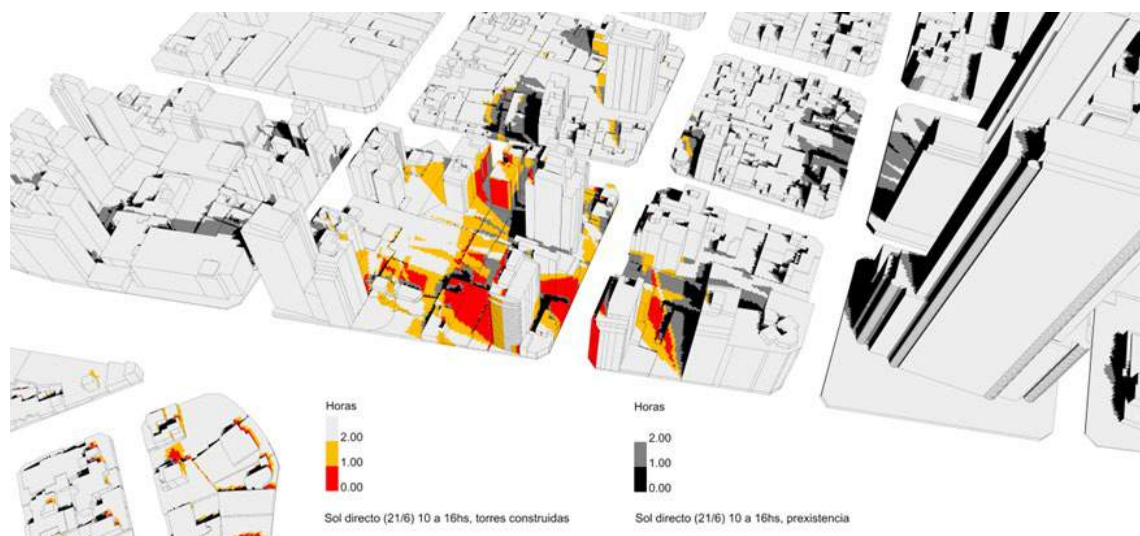


Figura 2. Zonas con menos de 2 horas de sol en invierno.

Otro estudio realizado analiza la reducción de la radiación solar en los techos de edificios en la zona de influencia. La radiación solar es un recurso potencial de energía renovable que se puede utilizar mediante módulos fotovoltaicos para generar energía y colectores solares térmicos para calentamiento de agua. El Plan Urbano Ambiental promueve el aprovechamiento de este recurso en CABA. Además, el Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires adhiere a la Ley Nacional 27424, de Generación Distribuida, que permite ‘exportar’ energía eléctrica generada con módulos fotovoltaicos en periodos de soleamiento favorable e ‘importar’ energía eléctrica en periodos deficitarios, evitando el uso de baterías. En este marco, los dueños y desarrolladores de edificios en la zona de influencia pueden perder total o parcialmente la posibilidad de incorporar estas instalaciones en edificios existentes y futuros.

A fin de evidenciar esta situación, se realizaron estudios con simulación numérica para evaluar la radiación solar recibida en las terrazas de los edificios del entorno, antes y después de la construcción del nuevo proyecto. A tal fin, se analizó el número de puntos en los techos y la reducción de la radiación

solar en cada uno de ellos. La Figura 3 indica el análisis de la reducción porcentual en la radiación solar recibida sobre todos los techos de la zona de influencia, presentada en orden descendente.

Mientras la Figura 4 presenta la disponibilidad del recurso solar en las terrazas superiores de los edificios en la zona de influencia, expresada como reducción de la energía recibida en kWh/m², la Figura 5 indica la reducción porcentual de la radiación solar disponible. Las superficies con mayor reducción corresponden a techos rodeados por edificios de mayor altura con limitada radiación inicialmente.

La combinación de las torres del proyecto con los edificios existentes en su entorno produce una reducción significativa, aunque solamente en aquellos techos que inicialmente contaban con limitada radiación solar. Cabe considerar que la radiación solar anual sobre superficie horizontal sin obstáculos es aproximadamente 1766 kWh/m², mientras la radiación anual sobre superficie inclinada a 30° alcanza 1989 kWh/m².

Los resultados indican una reducción de 10 % de la radiación anual en 10 % de las superficies en la zona de influencia, un porcentaje aceptable en una zona urbana con edificación existente en altura. En los edificios existentes, el espacio disponible en sus cubiertas es limitado debido a instalaciones de servicios, salas de máquinas, tanques de agua, conductos de ventilación, etc.

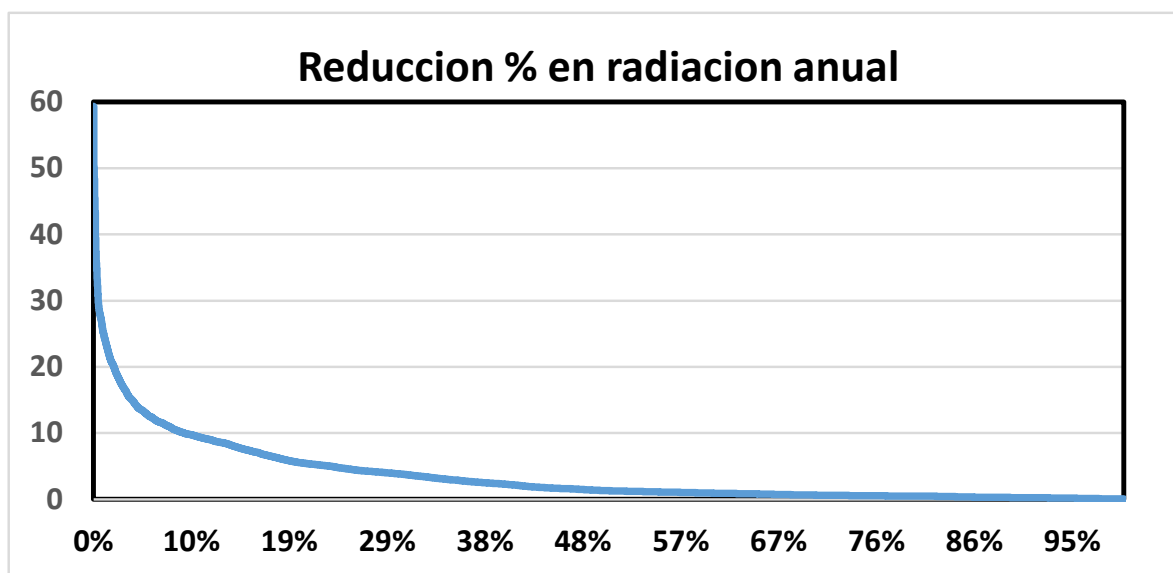


Figura 3. Reducción de radiación solar para todas las superficies analizadas.

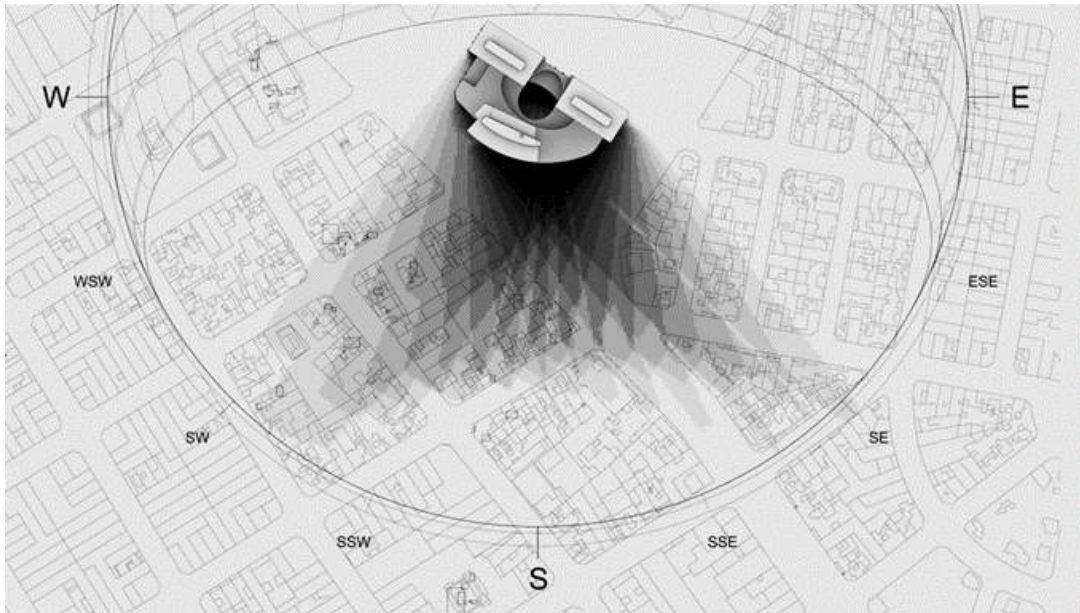


Figura 4: Estudio de proyección de sombras con simulación virtual.



Figura 5: Vista de la maqueta física en el Heliodon, mediodía en invierno.

EVALUACION DEL IMPACTO DE VIENTO

Los estudios de viento están basados en cuatro etapas: análisis de las características de los datos meteorológicos de Aeroparque, simulaciones CFD, ensayos en el túnel de viento y evaluación de las condiciones alrededor de los edificios en evaluación, según criterios de aceptabilidad de velocidad.

Las Figuras 6 y 7 indican la distribución de velocidades y las direcciones de viento, en base a los datos meteorológicos y archivos .epw. Se establece así la reducción de la velocidad a nivel peatonal respecto a la medición en la estación meteorológica a 10 m de altura, considerando el cambio en la rugosidad del suelo. Las velocidades indicadas corresponden a mediciones en la estación meteorológica, a 10 m de altura.

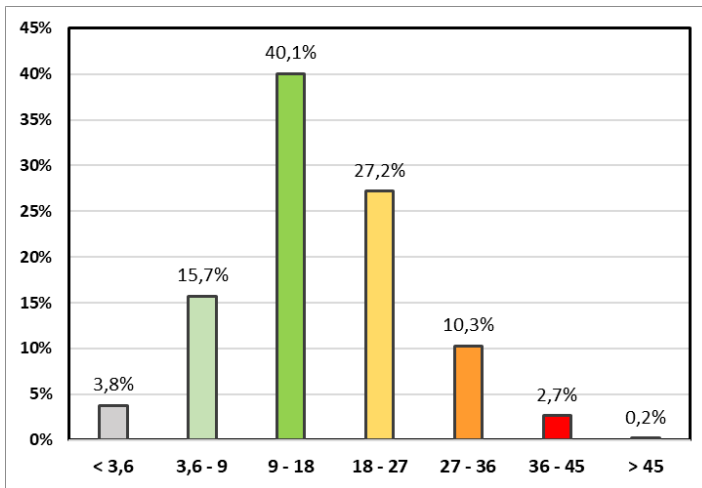


Figura 6. Porcentaje de observaciones según rango de velocidades de viento, solamente 3 % de las observaciones exceden 36 km/h.

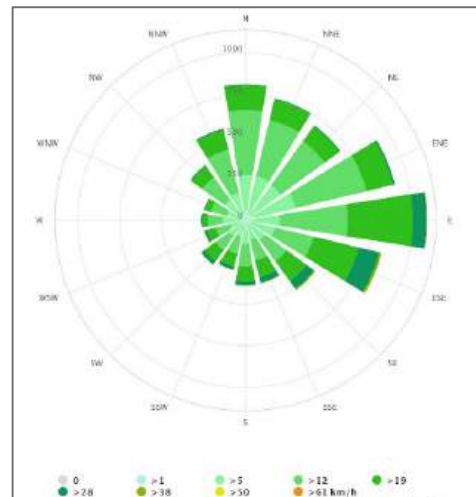


Figura 7. Dirección de vientos. Las frecuencias predominantes provienen de los sectores N, NE, E y SE.

Las Normas Urbanísticas y de Edificación de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires no establecen límites de velocidad de viento en espacios urbanos. Así, se adoptan los valores del Servicio Meteorológico Nacional en sus Alertas (SMN, 2022). En Alerta Amarilla, con velocidades de 55 km/h y ráfagas máximas de 65 km/h, las recomendaciones incluyen ‘evitar actividades al aire libre’. Con las rugosidades del suelo y la diferencia de altura, la velocidad media de viento a nivel peatonal es aproximadamente 20 km/h para Alerta Amarilla, 26 km/h para Alerta Naranja y 32 km/h, con ráfagas de 23, 32 y 38 km/h respectivamente. A continuación, se estimó el cambio en la velocidad de viento en zonas alrededor de las torres aplicando los resultados de las simulaciones CFD, según se muestra la Figura 8, y mediciones con maquetas físicas en el túnel de viento.

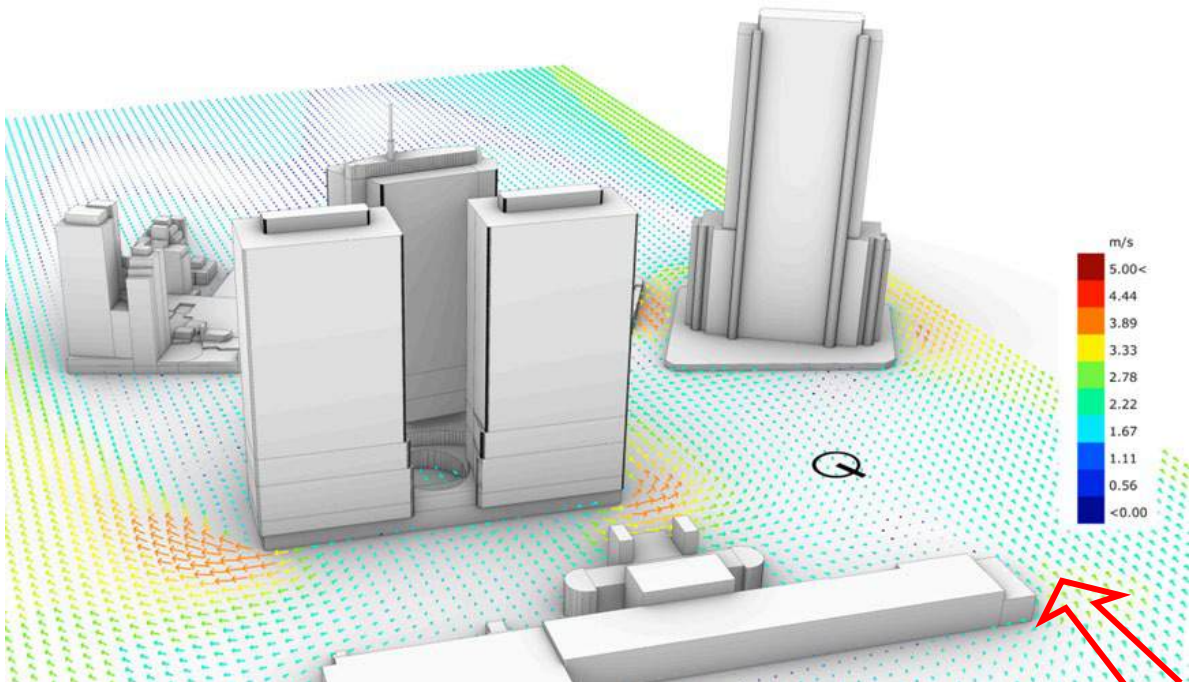


Figura 8. Simulación CFD de velocidad y dirección de viento a nivel peatonal, con viento NNE y aceleraciones en las esquinas.

Se compararon las velocidades simuladas y las medidas en ensayos en el túnel con los niveles aceptables en espacios urbanos. El análisis de los vientos más fuertes indica ocurrencias distribuidas en distintas horas del día. En las ubicaciones identificadas como ‘críticas’, las velocidades estimadas exceden los umbrales de aceptabilidad en menos de 1% de observaciones anuales. Dado que el 30 % de las observaciones corresponden a horas nocturnas sin actividad significativa en espacios exteriores, se consideró que el impacto de viento en la zona de influencia de las torres es ‘aceptable’ en una zona urbana que ya contaba con edificación en altura.

CONCLUSIONES

Los estudios del impacto de sol y viento en espacios urbanos en el entorno de un proyecto de edificios en altura permiten establecer las condiciones ambientales en relación con los niveles aceptables. Los resultados de los estudios permitieron identificar zonas problemáticas sin detectar condiciones que superen los límites ambientales en una zona de alta densidad y edificación en altura. En ese contexto, una de las innovaciones del trabajo es el aporte de la capacidad de demostración de la posibilidad de incorporar estos aspectos en Estudios de Impacto Ambiental, considerando que estos aspectos no fueron atendidos en estudios convencionales debido a la novedad de la temática y el limitado conocimiento de las técnicas de evaluación.

RECONOCIMIENTOS

Los estudios fueron realizados en el marco del Programa de Asistencia Técnica a Terceros en Arquitectura Bioambiental, PATT-AB, a cargo del Arq. Julian Evans, con sede en el Centro de Investigación Hábitat y Energía, CIHE, de la Secretaría de Investigaciones, SI, desde la Secretaría de Relaciones Institucionales, SERI, de la FADU-UBA.

Los autores reconocen los aportes del equipo de trabajo por sus aportes en los estudios de simulación numérica, construcción y ensayos de maquetas en el Laboratorio de Estudios Bioambientales: Mg. Arq. Angela Dub (coordinación y maquetas), Arqtos. Guillermo Tiscornia y Juan Manuel Gavieiro (simulación numérica), Arqtos. María Laura González y Alejandro Maggi (ensayos de viento), Arq. Diego Pappacena (maquetas, ensayos y calibración de equipo del laboratorio) y Arq. Agustín Weinberg (colaborador). La mayoría del equipamiento utilizado fue adquirido con subsidios de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UBA en el marco de Proyectos de Investigación UBACyT.

REFERENCIAS

- AADL (2001). Iluminación: Luz, Visión, Comunicación, Asociación Argentina de Luminotecnia, CABA: (Volumen 1. Capítulo 8. Iluminación en Oficinas, y Volumen 2. Capítulo 2. Alumbrado Público – Cálculo).
- Cheung, K. P. (2000). Discussion of heliodons for professional design and for teaching, in Roaf et al (2000), Congress Proceedings TIA-2000, Sustainable Buildings for the 21st century: teaching issues, tools and methodologies for sustainability, School of Architecture, Oxford Brookes University, European Communities, The Basingstoke Press Ltd.
- Danks, R. & Good, J. (2016). Urban Solar Reflection Identification, Simulation, Analysis and Mitigation: Learning from Case Studies, Proceedings IBPSA 2018. URL: <http://www.ibpsa.org> > 31-85-eSim2016.
- Evans, J. M. (2000). The Environmental Laboratory: Experiences and Applications in Teaching Architecture, in Proceedings TIA, Teaching the Teachers, Oxford Brookes University, Oxford.
- Evans, J. M. y de Schiller, S. (1997). Design for low angle sunlight in high latitudes techniques to analyse and improve visual comfort, Proceedings, PLEA'97 Passive and Low Energy Architecture, Volume 2. Pag. 813-819, Espoo-Otaniemi, Finland.
- Evans, Julian, y de Schiller, Silvia (2005). Técnicas de simulación en Laboratorio en el proceso de diseño para la calificación de sustentabilidad en arquitectura, Anais do VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, Ed. Actas ANTAC e ENCAC, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, págs. 632 a 640, Fortaleza, ISBN 85-894778-12-2.
- Evans, Julian, (2004) Laboratory simulation techniques in the design process to promote sustainability in architecture, in Proceedings PLEA 2005, Technical University of Eindhoven, Eindhoven.
- GCABA (2008). Plan Urbano Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, CABA. (Actualmente en proceso de revisión).
- GCABA (2019). Código de Edificación, Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, CABA. URL [Consulta 10/07/2023]: <https://buenosaires.gob.ar/desarrollourbano/nuevo-codigo-de-edificacion>

- GCABA (2019). Código Urbanístico, Ley N° 2.930, Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, CABA.
- GCABA (2020) PUA, Plan Urbano Ambiental, Informe de Gestión PUA 2020, Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, CABA.
- GCABA (2020). Manual de Estándares Mínimos del Espacio Público de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Subsecretaría de Gestión Comunal y Subsecretaría de Paisaje Urbano, CABA. (separata del Boletín Oficial N 6027- ANEXO I).
- GCABA (2020). PUA, Plan Urbano Ambiental, Informe de Gestión PUA 2020, Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, CABA, Buenos Aires.
- Givoni, B. (1987). Guidelines for Urban Design in Different Climates, World Meteorological Organization, Ginebra.
- Gustfront (2015). Temperatura mín. y máx. medias mensuales desde 1908, hasta la actualidad, OCBA. Observatorio Central de Buenos Aires, CABA, Buenos Aires. URL [Consulta 08/08/2023]: <https://buenosaires.gob.ar/sites/default/files/media/document/2021/02/25/6098ea19e0d9b7d7daa45c58a9a17c107764473d.pdf> .
- IRAM (2012) Norma IRAM 11603:2012, Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación Bioambiental de la República Argentina, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- Ladybug Tools (2023). What is ladybug Tools? URL [Consulta 13/08/2023]: <https://www.ladybug.tools/>
- MAYDS (2018) Guía para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental, Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sustentable CABA.
- Meteorological Office (1997). Observers Handbook, HMSO, Londres.
- Muneer, T. (2004). Solar radiation and daylight models for the energy efficient design of buildings, Architectural Press, Second Edition, Oxford.
- NOAA (2022). Solar Calculations NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, EEUU. URL [Consulta 10/07/2023]: <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/calcdetails.html>
- SAyDS (2018). Guía para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental, Secretaría del Ambiente y Desarrollo Sustentable, CABA.
- Secretaría de Energía (2020). Manual de Generación Distribuida Solar Fotovoltaica, Secretaría de Energía, CABA.
- Secretaría de Vivienda de la Nación (2019). Estándares Mínimos de Calidad para Viviendas de Interés Social: Marco para la Promoción de Viviendas Inclusivas, Asequibles y Sostenibles, Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda, CABA.
- SEDUV (2000). Estándares Mínimos de Calidad para Viviendas de Interés Social Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, Buenos Aires.
- SMN (1984). Datos Meteorológicos 1970-1980, Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires.
- SMN (1992). Estadísticas Climatológicas 1981-1990, Serie B, N° 37, Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires.
- SMN (1996). Estadísticas Meteorológicas 1991-1995, Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires.
- SMN (2022) SAT: Sistema de Alerta Temprana, Módulo: Umbrales para los Alertas, Servicio Meteorológico Nacional, CABA.
- USC (1969) S. 1075 (91st): Act to establish a national policy for the environment, United States Congress, Washington D.C. URL [Consulta: 10/07/2023]: <https://www.govtrack.us/congress/bills/91/s1075> [
- World Bank Group (2022). World Wind Atlas, version 3.1, URL [Consulta 10/05/2023]: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0038957/Global-Wind-Atlas>

ENVIRONMENTAL IMPACT OF SUN AND WIND IN URBAN SPACES: STUDY AND ASSESSMENT OF IMPACTS OF HIGH-RISE BUILDINGS

ABSTRACT: This paper presents the studies developed for the impact of sun and wind in urban spaces around tall buildings. The studies were carried out as a result of objections raised at a public hearing in the framework of a project and the related environmental impact study. Acceptable conditions in urban spaces were analysed with the sun regime, impact of shadows, annoying reflections and wind

modification in the area under study, followed by simulations of the impact of sun and wind were carried out with numerical simulation programs and models in the sun simulator of the impact of sun and the low-speed wind tunnel. The acceptable environmental conditions were compared with the conditions before and after the construction of the new project. Finally, the results were analysed and recommendations proposed for urban studies of protection of natural resources in the environmental impact of high-rise buildings.

Key words: Environmental impact, wind, sun, high-rise building, urban planning code.

RENDIMIENTO TERMICO EN CIRCUITO ABIERTO DE UN COLECTOR SOLAR DE AIRE DE GRAN LONGITUD PARA SECADO INDUSTRIAL

Miguel Condorí, Gonzalo Duran

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO),

Universidad Nacional de Salta,

CONICET,

Av. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina

(54) (387) 4258709. Email: miguel.angel.condori@gmail.com

RESUMEN: Se estudia un calentador solar de aire de paso paralelo, de 9,76 m de longitud, en condiciones de funcionamiento de cielo claro y temperatura de entrada igual a la temperatura ambiente. Con un modelo cuasi estacionario que considera la masa térmica de la placa, se obtiene un método para determinar parámetros relacionados con el rendimiento térmico de este tipo de calentador. La eficiencia térmica instantánea en función del tiempo tiene una pendiente ligeramente positiva, cuya media es estable para ángulos de incidencia de la radiación solar hasta 30°. Esta media corresponde a la eficiencia óptica en estado estacionario del colector. En estado no estacionario, se obtiene una relación lineal entre las diferencias de temperaturas placa-ambiente y aire de salida-ambiente, con 98,6% de ajuste para un flujo de 0,19 kg/s. Se obtiene la curva del rendimiento térmico del colector en función del caudal másico de aire.

Palabras claves: modelo cuasi estático, colector solar de aire, eficiencia térmica, secado solar.

INTRODUCCION

Existen diferentes tipos de calentadores solares de aire utilizados en el secado de productos agrícolas. Estos calentadores son el componente principal del secador indirecto por convección, que producen total o parcialmente la energía térmica necesaria en el proceso de secado (EL-Mesery et al., 2022; Fudholi y Sopian, 2019; Ortiz-Rodriguez et al., 2022). El secado solar industrial necesita banco de colectores conectados en serie y en paralelo, definiendo la línea en serie la temperatura de salida y las conexiones en paralelo el volumen total de aire caliente. El secado de hortalizas requiere temperaturas entre 40°C y 60°C. Un calentador solar largo produce temperaturas más altas, pero mezclado con aire ambiente puede proporcionar la temperatura requerida por más tiempo (Cesar-Munguia et al., 2022; Condorí et al., 2017; Pankaew et al., 2020). El colector objeto de estudio, se desarrolló para un banco de diez calentadores solares de aire que entregó durante 6-7 h temperaturas alrededor de los 50°C con un flujo másico de 0,06 kg/s por colector (Duran y Condorí, 2013).

La determinación de la eficiencia térmica de calentadores solares de aire largos es un tema en desarrollo. Los métodos de determinación de rendimiento más utilizados en calentadores solares convencionales se basan en el modelo de estado estacionario de Hottel-Whillier-Bliss (HWB), que utiliza condiciones ambientales restrictivas y temperatura de entrada controlada. Las mediciones de campo se realizan con días claros, en un pequeño intervalo alrededor del mediodía solar, considerando el ángulo de incidencia de la radiación respecto de la normal y la constante de tiempo del colector (Duffie y Beckman, 2013; Osório y Carvalho, 2014; Rojas et al., 2008). Para mediciones bajo norma el método es válida para ángulo de incidencia menor a 20° y radiación solar, temperatura ambiente, y temperatura de entrada con desvíos menores a $\pm 50 \text{ W/m}^2$, $\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 0, 1^\circ\text{C}$, respectivamente (Fischer et al., 2004).

En el caso de calentadores solares de aire, la temperatura de entrada es igual a la temperatura ambiente y, de acuerdo con el modelo HWB, la eficiencia térmica es igual a la eficiencia óptica del calentador. El

modelo asume condiciones ambientales constantes para intervalos cortos que superen el requerido por la constante de tiempo. Los colectores con gran inercia térmica, debido a los materiales utilizados, presentan diferencia de fase entre la temperatura de salida y la radiación solar incidente, produciendo registros erróneos de eficiencia cuando aumenta o disminuye la radiación solar. Ejemplos de calentadores másicos son el colector de 50 m de longitud formado por un lecho de piedras desarrollado por Saravia et al. (1983) y el colector solar de aire sin cubierta integrado a la pared, consistente de un solo panel de 26 m² de superficie desarrollado por Paya-Marín et al. (2015).

El comportamiento de colectores con constante de tiempo grande se describe mejor por un modelo no estacionario. El método dinámico más simple incorpora la corrección de la masa térmica al modelo estacionario HWB (Nayak y Amer, 2000). Existen otros modelos dinámicos que añaden más términos de corrección y permiten una descripción más detallada del comportamiento del colector, pero requieren simulación computacional (Fan et al., 2020; Osório y Carvalho, 2014). La mayoría de estos métodos requieren control de la temperatura de entrada (Obstawski, Bakoń, y Czekalski, 2020).

En el presente trabajo, se caracteriza la eficiencia térmica de un colector solar de aire de 9,76 m de longitud, con placa de absorción de chapa ondulada y paso de aire paralelo, por encima y debajo de la placa. Se propone un modelo cuasi estacionario simple del calentador solar, donde se considera acumulación de calor en la placa de absorción, y se estudia el rendimiento térmico del calentador en condiciones de cielo claro, en circuito abierto y temperatura de entrada igual a la temperatura ambiente, utilizando el modelo cuasi estacionario.

EL COLECTOR



Figura 1: Etapas de construcción del colector prototipo. Fuente (Duran y Condorí, 2013).

El colector bajo estudio, de 9,76 m de largo, 0,94 m de ancho y 0,10 m de alto, se presentó en un trabajo anterior, junto con las medidas que aquí se utilizan (Duran y Condorí, 2013), por lo que sólo se mencionan los aspectos constructivos relevantes. En la Fig. 1 se muestra las etapas de construcción del colector. El cuerpo se construyó con chapa galvanizada lisa, plegada en los laterales para formar el cajón. En el interior del cajón se colocó una sola pieza de aislamiento térmico de lana de vidrio, con la lámina de aluminio reforzado mirando hacia arriba. Como placa se colocó una chapa ondulada, con canaletas paralelas a la dirección del flujo de aire. Se utilizaron tacos de madera para separar la chapa del aislante térmico. La cara superior de la chapa se pintó de color negro mate. Por encima del cajón se colocó la cubierta de policarbonato alveolar transparente. La cubierta se pega con sellador siliconado y se sujeta al cajón con ángulos de chapa galvanizada de 25 mm de lado.

LOS DATOS MEDIDOS

El prototipo se orientó mirando al norte, con el largo en la dirección este-oeste, y pendiente fija optimizada para el medio día solar. Se utilizó un datalogger NUDAM 425 para tomar datos con frecuencia de medio minuto, al cual se conectaron sensores para medir temperatura ambiente, radiación solar global sobre plano del colector y temperaturas de aire a la entrada y salida del colector. Se midió manualmente, en diferentes momentos y en varios puntos de la sección de entrada, la velocidad de flujo de aire. Se usaron termopares tipo K, con blindaje de radiación con protección de papel aluminio, para medir las temperaturas de aire. La radiación solar fue medida con un piranómetro fotovoltaico LICOR Li – 200 en el plano del colector. La velocidad de aire con un anemómetro de hilo caliente TSI VelociCalc, tomando el promedio de los valores medidos. En la calibración de los termopares se obtuvo en todos los casos un error absoluto inferior a 0,2 °C. El error de medición del piranómetro es del 3% y del 3% para el anemómetro, ver esquema de la Fig. 2.

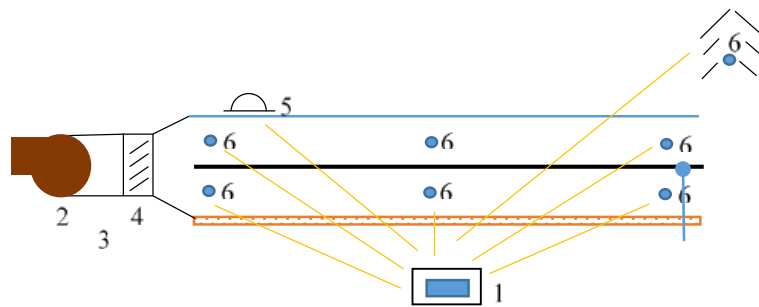


Figura 2: Esquema del sistema de medición. 1-datalogger, 2-ventilador, 3-anemómetro, 4-regulador de flujo, 5-piranómetro, 6-termopares.

Tabla 1: Valores medio de flujo másico, eficiencia térmica, salto térmico, energía útil, radiación solar y temperatura ambiente, para 30° de ángulo de incidencia y radiación mayor a 600 W/m2.

Fecha	Flujo (Kg/s)	η	To-Ta (°C)	Qu (W)	I (W/m2)	Ta (°C)
Jun 4	0.13	0.59	32.6	4273	830	19.2
Jun 5	0.14	0.65	30.4	4288	760	20.8
Jun 6	0.22	0.61	19	4203	791	21.4
Jun 8	0.06	0.39	44.2	2673	793	19.8
Jun 20	0.16	0.51	22	3239	805	16.8
Jun 22	0.16	0.51	20.8	3349	751	23.2
Jun 26	0.15	0.53	23.3	3036	760	16.5
Jun 27	0.19	0.51	20.3	3278	734	18
Dic 13	0.33	0.52	14.5	4818	1063	31.0
Dic 18	0.28	0.56	16.6	5132	977	31
Dic 19	0.27	0.51	17.2	4604	1056	32.0
Dic 22	0.07	0.44	55.1	3884	1008	30.9

Dado que el flujo de aire pasa por abajo y arriba de la placa, se midieron las temperaturas de aire a la entrada y salida tanto del canal superior como del inferior. La diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida se calcula con la Ec. (1), y la temperatura media con la Ec. (2).

$$T_o - T_i = \frac{1}{2} [(T_{o,up} + T_{o,down}) - (T_{i,up} + T_{i,down})] \quad (1)$$

$$T_m = \frac{1}{2} [(T_{o,up} + T_{o,down}) + (T_{i,up} + T_{i,down})] \quad (2)$$

donde $T_{o,up}$, $T_{i,up}$ son las temperaturas de aire del canal superior y $T_{i,down}$, $T_{o,down}$ las del canal inferior.

De los ensayos realizados se seleccionaron 12 con distintos flujos de aire y ángulo de incidencia de 30° alrededor del mediodía solar. En la Tabla 1 se muestran los promedios para cada ensayo, de eficiencia

térmica, salto térmico y calor útil, radiación sobre plano del colector y temperatura ambiente, y radiación solar total sobre plano del colector mayor a 600 W/m².

EL MODELO ANALITICO

Se considera un modelo sencillo para el colector solar de aire de paso paralelo, que consta de una cubierta superior transparente, una placa absorbente, flujo de aire que pasa por dos canales, superior e inferior a la placa absorbente, y aislamiento térmico por debajo y a los lados de la caja del colector. Este modelo se basa, con modificaciones, en otro presentado anteriormente Duran y Condorí (2013).

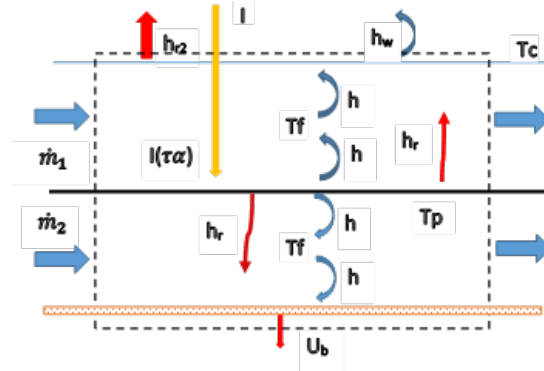


Figura 3: Elemento de volumen del calentador solar de aire de paso paralelo

La Fig. 3 muestra un elemento de volumen del colector. Se consideran nodos de temperatura uniforme para placa, cubierta y fondo, mientras que la temperatura del aire tiene variación unidimensional en la dirección del flujo. Se considera que las temperaturas y el flujo de aire de cada canal son aproximadamente iguales. Las superficies de cubierta, placa y fondo se consideran iguales. Se considera acumulación de calor sólo en la placa, y que la temperatura del cielo es igual a la temperatura ambiente, que los coeficientes por convección dentro del colector son iguales, y lo mismo para los coeficientes por radiación, y que las propiedades físicas son constantes respecto a la variación de temperatura.

En el balance de energía en la placa, Ec. (3), el término de la izquierda al símbolo igual representa la masa térmica y a la derecha, se tiene la radiación incidente efectiva sobre la placa, las pérdidas térmicas por convección hacia el flujo de aire de los canales superior e inferior, las pérdidas por radiación con la cubierta y las pérdidas por radiación con la superficie de fondo.

$$z\rho_p C_p \frac{dT_p}{dt} = (\tau\alpha_p)I + 2h(T_{fm} - T_p) + h_r(T_c - T_p) + h_r(T_b - T_p) \quad (3)$$

En el balance de energía del flujo de aire, Ec. (4), utilizando las suposiciones antes mencionadas se obtiene una sola ecuación donde el flujo másico es el doble al de cada canal. A la derecha de la igualdad, las ganancias de calor se deben a la convección con las dos superficies de la placa, la cubierta y el fondo.

$$\frac{1}{a} \dot{m}_a C_{pa} \frac{dT_{fm}}{dx} = 2h(T_p - T_{fm}) + h(T_c - T_{fm}) + h(T_b - T_{fm}) \quad (4)$$

En el balance de energía en la cubierta, Ec. (5), se incluye convección con el flujo de aire, radiación térmica con la placa, pérdidas térmicas por el viento y pérdidas por radiación hacia el cielo. Las dos últimas están en un único coeficiente que considera las pérdidas hacia temperatura ambiente, Ec. (6).

$$0 = h(T_{fm} - T_c) + h_r(T_p - T_c) + U_t(T_a - T_c) \quad (5)$$

$$U_t = h_w + h_{r1} \quad (6)$$

En el balance de energía de la superficie de fondo, Ec. (7), se incluye pérdidas por convección con el flujo de aire, por radiación a la placa, y por conducción a través de la aislación térmica, Ec. (8), que incluye la contribución de los laterales.

$$0 = h(T_{fm} - T_b) + h_r(T_b - T_p) + U_b(T_a - T_b) \quad (7)$$

$$U_b = \frac{k}{e} + \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \quad (8)$$

Las ecuaciones (3), (4), (5), y (7) conforman un sistema consistente, con dos condiciones de borde para el fluido, $T_{fm}(0) = T_a$ y $T_{fm}(L) = T_{out}$, donde L es la longitud del colector, T_{out} la temperatura de salida del colector, y una condición inicial para la temperatura de placa $T_p(0) = T_{p0}$, para todo intervalo dentro del cual las otras variables se consideran constantes. Utilizando Ecs. (5) y (7) para sustituir $(T_c - T_p)$ y $(T_b - T_p)$ en Ec. (3), esta última se reduce a la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{dT_p}{dt} = P_1 + P_2 T_{fm} - P_3 T_p \quad (9)$$

$$P_0 = \frac{1}{z\rho_p c_p} \quad (10)$$

$$P_1 = P_0 \left\{ (\tau\alpha_p)I + \left[U_b + \frac{h_r U_t}{(h_r + U_t + h)} \right] T_a \right\} \quad (11)$$

$$P_2 = P_0 P_4 \quad (12)$$

$$P_3 = P_0 P_5 \quad (13)$$

$$P_4 = h + \frac{h_r h}{(h_r + U_t + h)} \quad (14)$$

$$P_5 = U_b + h + \frac{h_r (U_t + h)}{(h_r + U_t + h)} \quad (15)$$

Para su resolución se considera que I , T_a y el gradiente de T_f no varían dentro intervalo $\Delta t = t - t_0$. Entonces, Ec. (9) es una ecuación diferencial de primer orden con coeficientes constante respecto del tiempo, con la condición inicial $T_p(t_0) = T_{p0}$, que tiene la siguiente solución:

$$T_p = T_{p0} e^{-P_2(t-t_0)} + (1 - e^{-P_2(t-t_0)}) \frac{P_1}{P_3} + (1 - e^{-P_2(t-t_0)}) \frac{P_2}{P_3} T_{fm} \quad (16)$$

Reemplazando Ecs. (16), (5) y (7) en Ec. (4), se obtiene una ecuación diferencial de primer orden con coeficientes constantes respecto de la posición.

$$\frac{dT_{fm}}{dx} = F_1 + F_2 T_{fm} \quad (17)$$

$$F_1 = F_3 \left[T_{p0} e^{-P_2(t-t_0)} + \frac{P_1}{P_3} (1 - e^{-P_2(t-t_0)}) + (F_4 - 1) T_a \right] \quad (18)$$

$$F_2 = F_3 \left[\frac{P_2}{P_3} (1 - e^{-P_2(t-t_0)}) - F_4 \right] \quad (19)$$

$$F_3 = \frac{ah(2h_r + U_t + h)}{m_a c_{pa} (h_r + U_t + h)} \quad (20)$$

$$F_4 = 1 + \frac{U_t}{(2h_r + U_t + h)} \quad (21)$$

Que se resuelve con las condiciones de borde $T_{fm}(0) = T_a$ y $T_{fm}(L) = T_{out}$

$$T_{out} - T_a = (e^{F_2 L} - 1) \left(T_a + \frac{F_1}{F_2} \right) \quad (22)$$

$$T_{out} - T_a = \frac{(1 - e^{F_2 L})}{P_5 F_4 - (1 - e^{-P_3(t-t_o)}) P_4} \left[(1 - e^{-P_3(t-t_o)}) (\tau \alpha_p) I + P_5 (T_{po} - T_a) e^{-P_3(t-t_o)} \right] \quad (23)$$

A partir de Ec. (23) se determina el calor útil y la eficiencia térmica del colector, para condición de temperatura de entrada igual a la temperatura ambiente, utilizando sus definiciones.

$$Q_u = \dot{m}_a C_{pa} (T_{out} - T_a) \quad (24)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{I A_c} \quad (25)$$

La expresión de la eficiencia térmica del colector para un dado intervalo de tiempo queda definida por:

$$\eta = F_R \left[(1 - e^{-P_3(t-t_o)}) (\tau \alpha_p) + P_5 e^{-P_3(t-t_o)} \frac{(T_{po} - T_a)}{I} \right] \quad (26)$$

donde F_R es el factor de remoción de calor del colector:

$$F_R = \frac{\dot{m}_a C_{pa}}{A_c} \left(\frac{1 - e^{-F_2 L}}{P_5 F_4 - (1 - e^{-P_3(t-t_o)}) P_4} \right) \quad (27)$$

La Ec. (26) tiene una componente que involucra a la diferencia entre las temperaturas inicial de placa y la ambiente, dividido por la radiación solar sobre el colector. En el intervalo, este término aumenta inicialmente la eficiencia del colector, pero el aporte disminuye con el tiempo mientras se cumpla la condición para $\Delta\tau = t - t_o$ que I y T_a sea constantes. Para uso práctico se pueden requerir las mismas condiciones que para el modelo HWB, es decir aceptar variaciones de la radiación dentro de $\pm 50 \text{ W/m}^2$ y de temperatura ambiente de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Existen dos comportamientos límites que simplifican la ecuación.

Si $\Delta\tau \rightarrow \infty$ entonces $e^{-P_3 \Delta\tau} \rightarrow 0$. Es el caso de estado estacionario cuando se supera la constante de tiempo del colector. En la práctica se considera un valor próximo a cero, con error menor al 5%, cuando $\Delta\tau > 3P_3$. La eficiencia térmica será igual a la eficiencia óptica del colector, y el factor de remoción será constante. Es una expresión simple, donde la eficiencia está controlado por el coeficiente de remoción de calor, que a su vez depende del coeficiente global de pérdidas y del factor de eficiencia.

$$T_{out} - T_a = \frac{(1 - e^{F_2 L})}{P_5 F_4 - P_4} (\tau \alpha_p) I \quad (28)$$

$$F_2 = F_3 \left(\frac{P_2}{P_3} - F_4 \right) \quad (29)$$

$$\eta = F_R (\tau \alpha_p) \quad (30)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}_a C_{pa}}{A_c} \left(\frac{1 - e^{-F_2 L}}{P_5 F_4 - P_4} \right) \quad (31)$$

Si $\Delta\tau \rightarrow 0$ entonces $e^{-P_3 \Delta\tau} \rightarrow 1$. En este caso $T_{po} \approx T_p(t)$, y el efecto de la masa térmica es máximo. En la práctica se cumple con valores medidos con frecuencia menores al minuto.

$$T_{out} - T_a = \left[\frac{(1 - e^{F_2 L})}{F_4} \right] (T_p - T_a) \quad (32)$$

$$F_2 = -F_3 F_4 \quad (33)$$

La Ec. (32) establece para valores instantáneos una relación lineal entre el salto de temperatura del colector respecto de la temperatura ambiente y la diferencia entre la temperatura de placa y la ambiente para ese instante. Este resultado implica, de acuerdo con la Ec. (25), que una representación de la eficiencia térmica instantánea en función de la variable $(T_p - T_a)/I$, tendrá pendiente positiva.

RESULTADOS

En base a la Tabla 1, se muestra el calor útil en función del flujo másico en la Fig. 4 para ángulo de incidencia hasta 30°. En la Ec. (22), se consideró la densidad y la capacidad calorífica del aire de acuerdo con la temperatura media del colector. La marca indica el valor medio y los guiones los máximos y mínimos, según corresponda. En el eje de las abscisas se indica el flujo másico del colector y el día de ensayo. Si bien el calor útil tiene en cuenta la temperatura de salida y la temperatura ambiente, los resultados dependen de la radiación solar incidente. Es por ello que se prefiere la eficiencia térmica para correlacionar con el flujo másico, Fig. 5.

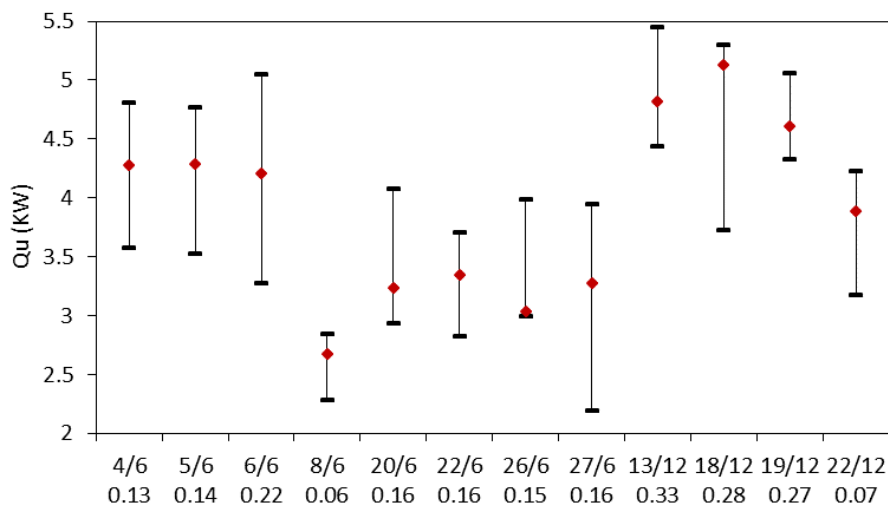


Figura 4: Calor útil en función del flujo de aire circulante en cada ensayo.

Se muestra la curva de eficiencia térmica en función del flujo másico en la Fig. 5. El coeficiente de ajuste es deficiente 0,49, sin embargo, permite predecir un comportamiento y un valor de flujo óptimo. La curva muestra un máximo en aproximadamente 0,22 kg/s de flujo; entre 0,15 kg/s y 0,28 kg/s la eficiencia disminuye menos del 5%. En diciembre, durante un rango de cuatro horas alrededor del mediodía solar, con un flujo de aire de 0,07 kg/s se produce un salto de temperatura respecto del ambiente de 55 °C, entregando un calor útil de 3.884 kW con una eficiencia media del 44%. En junio, con flujo de aire similar, el salto de temperatura disminuye 10 °C y la energía útil 1 kW.

En la Fig. 6 se muestra la eficiencia instantánea para distintos flujos de aire. Se observa en todos los casos un comportamiento similar, que correlaciona bien con una recta de pendiente positiva suave, mostrando la repetitividad del comportamiento con distintos flujos. También se corroboró la

repetitividad de resultados bajo condiciones similares de flujo y ambiente. La Fig. 7 muestran la eficiencia instantánea de dos días de condiciones ambientales similares con 0.16 Kg/s de flujo de aire.

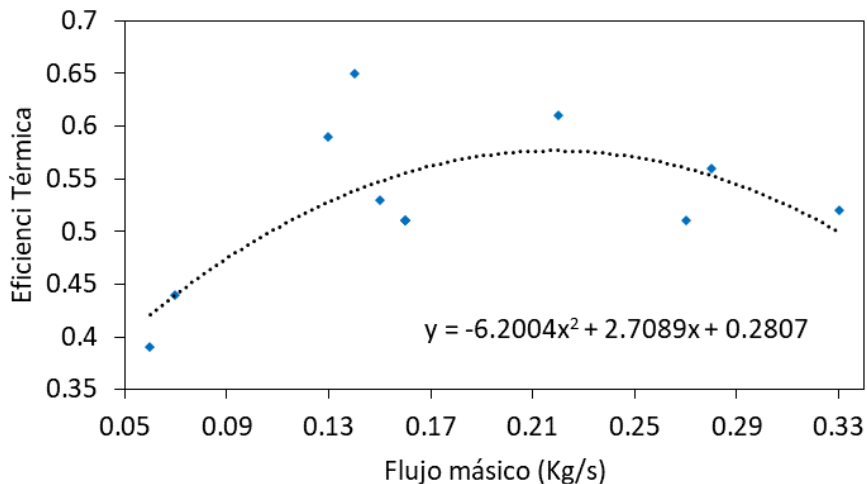


Figura 5: Eficiencia media del colector prototipo en función del flujo másico del aire.

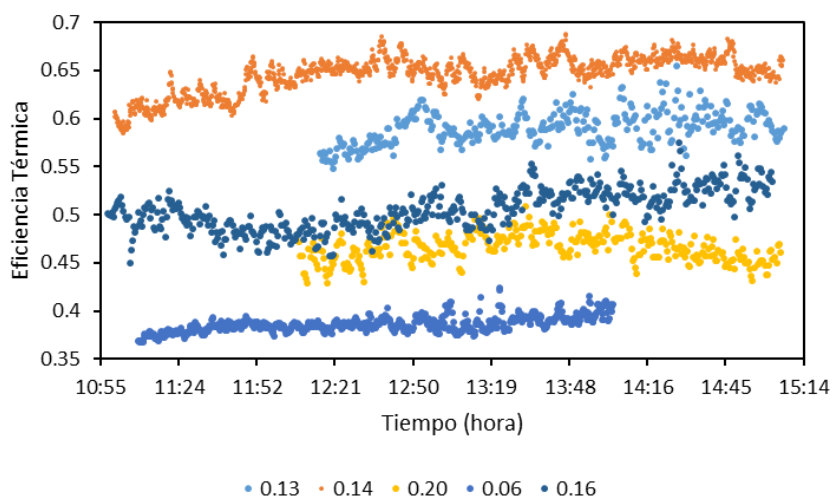


Figura 6: Eficiencia instantánea del colector prototipo en función del tiempo para ensayos con distintos flujos másicos del aire.

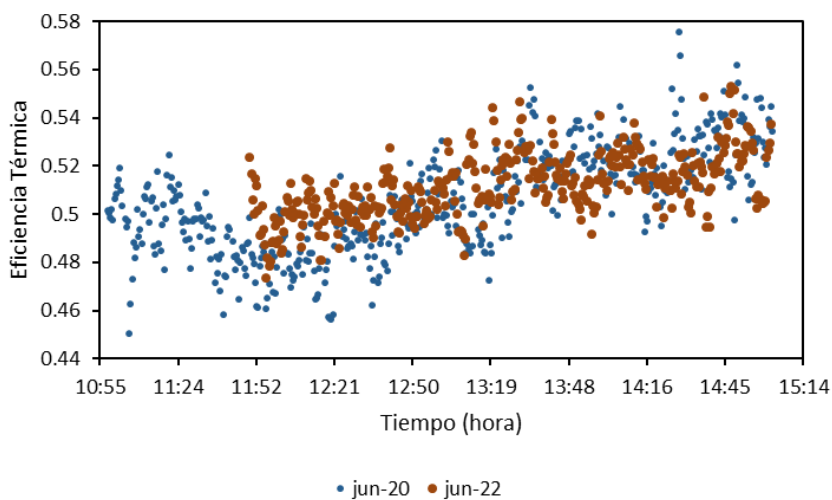


Figura 7: Eficiencia instantánea del colector prototipo en función del tiempo para dos ensayos con el mismo flujo másico del aire.

A fin de corroborar los resultados del modelo para un día en particular, la Fig. 8 muestra las medidas de temperatura ambiente, radiación solar sobre plano del colector, y temperaturas de entrada (T_{in}), salida (T_{out}) y media del colector (T_m), para el día 20 de junio, con un flujo de aire de 0.16 kg/s, con filtro de ángulo de incidencia de 30° y radiación solar superior a 600 W/m².

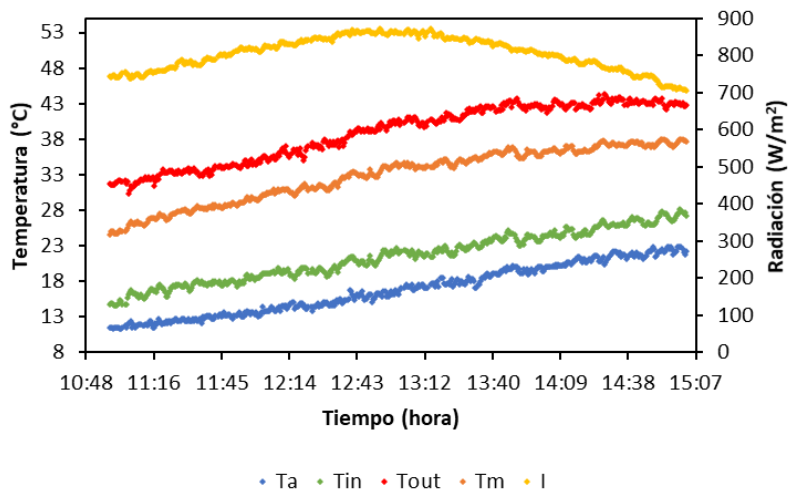


Figura 8: Temperatura ambiente, tres puntos del colector y radiación solar para el día 20/06, con filtro de radiación mayor a 600 W/m² y ángulo de incidencia 30°.

Se calcula calor útil y eficiencia térmica, Ecs. (24) y (25), y los resultados se muestran en la Fig. 9. Se observa que el promedio de los valores instantáneos, líneas de puntos, compensa el efecto de la inercia térmica de la mañana y de la tarde, y el resultado tendrá pocas diferencias con la eficiencia de estado estacionario de Ec. (30). El intervalo debe ser simétrico alrededor del mediodía solar, y se determina por el ángulo de incidencia. Se analizaron los promedios de la eficiencia térmica instantánea dentro de ángulos de incidencia de 30°, 20°, y 10° obteniendo prácticamente el mismo resultado. La Fig. 9, corresponde a ángulo de 30°, y se muestra en líneas de punto el valor promedio 0.505, que tiene un error de desviación de 0.001, con un intervalo de confianza del 95% entre (0.503; 0.507).

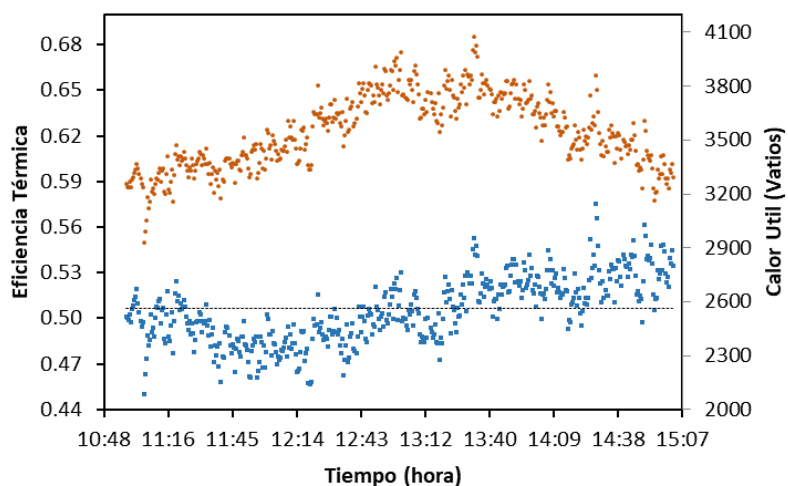


Figura 9: Eficiencia térmica y calor útil en función del tiempo, con filtro ángulo de incidencia de 30°.

A fin de corroborar la Ec. (32), se utilizó el ensayo del 27 de junio con un flujo de 0,19 kg/s, midiendo la temperatura de placa, con una termopila adherida por debajo y ubicada a la salida del colector. En la Fig. 10 se muestra la diferencia de temperaturas placa-ambiente, eje de abscisas, y aire a la salida-ambiente, en el de ordenadas. Se obtiene una correlación lineal con pendiente 1.184 y coeficiente de ajuste 0,98. Debido a la dificultad para medir temperatura de placa, las mediciones pueden estar afectada

por la convección del aire, subestimando el valor correcto de la pendiente. No obstante, es claro el comportamiento lineal de la correlación.

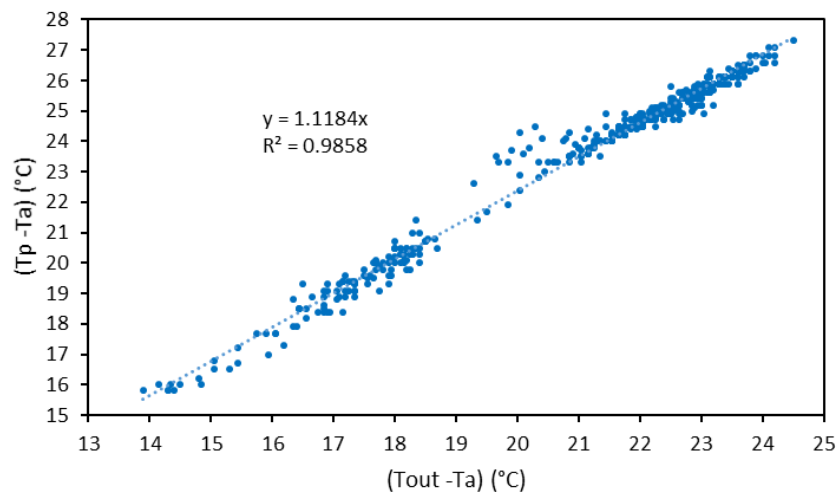


Figura 10: Correlación entre los saltos de temperatura entre la temperatura de placa y el ambiente, y entre la temperatura de salida y el ambiente, para el ensayo del 27 de junio.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo analítico cuasi estacionario para un calentador solar de aire de paso paralelo, que considera la masa térmica de la placa de absorción. De acuerdo con el modelo, este efecto involucra a la temperatura inicial de la placa de absorción y un coeficiente relacionado con el tiempo transcurrido, que representa un aumento de la eficiencia térmica en función del tiempo para valores no estacionarios y tiempos menores a la constante térmica del colector.

Para el estado no estacionario, se encuentra una relación lineal positiva entre la diferencia de temperaturas salida-ambiente y la diferencia placa-ambiente para valores instantáneos. Se corroboró este comportamiento en el calentador prototipo para un flujo de aire de 0,19 kg/s. Para el estado estacionario, se encuentra, para un flujo de 0,16 kg/s, que hay pocas diferencias entre aplicar el método filtrando datos con la constante de tiempo del colector, y tomar directamente un promedio de la eficiencia instantánea con valores simétricos alrededor del mediodía solar. Este promedio se mostró muy estable para ángulos de incidencia de hasta 30°, pero que depende del flujo de aire.

Los ensayos con flujo de aire variable brindan información importante para el diseño. En el caso del prototipo, se realizaron 12 ensayos y se utilizó el valor medio para correlacionar con la eficiencia térmica. Para el colector prototipo, el comportamiento de la curva de eficiencia térmica en función del flujo de aire muestra la tendencia de un valor máximo del 58% para un flujo de 0,22 kg/s.

Las expresiones obtenidas permiten determinar parámetros que caracterizan el rendimiento térmico del colector solar de aire, en condiciones de campo para días claros. La metodología requiere medir las mismas variables que el método convencional, pero permite un intervalo mayor de ángulo de incidencia. Dado esta flexibilidad, requiere menos días y su implementación resulta más sencilla que el método convencional.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo fue financiado por el Consejo de Investigación Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

NOMENCLATURA

h Coeficiente de transferencia de calor por convección placa-fluido

h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación desde placa
h_{r1}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación cubierta-cielo
h_w	Coefficiente de transferencia de calor debido al viento
k	Conductividad térmica de la aislación
e	Espesor de la aislación térmica
\dot{m}_a	flujo másico del aire (kg/s)
T_{fm}	Temperatura del flujo de aire (°C)
T_{out}	Temperatura del aire a la salida (°C)
T_c	Temperatura de cubierta (°C)
T_b	Temperatura de la superficie del fondo
T_p	Temperatura de la placa
T_{p0}	Temperatura inicial de la placa
T_a	Temperatura ambiente (°C)
I	Insolación sobre plano del colector (W/m ²)
$(\tau\alpha_p)$	Producto transmitancia-absortancia efectivo
A_c	Área del colector (m ²)
L	Longitud del colector (m)
a	Ancho del colector (m)
z	Espesor de la placa de absorción (m)
V_m	Volumen de la placa de absorción (m ³)
ρ_p	Densidad de la masa de la placa
C_p	Capacidad calorífica de la masa de la placa (J/Kg °C)
C_{pa}	Capacidad calorífica del flujo de aire (J/Kg °C)
F_R	Factor de remoción de calor
τ	Transmitancia de la cubierta
α_p	Absortancia solar de la placa
U_b	Coefficiente global de pérdidas por conducción aislación-ambiente

REFERENCIAS

- Cesar-Munguia, A. L., García-Valladares, O., Pérez Espinosa, R., & Domínguez-Niño, A. (2022). Hybrid thermosolar-LPG dehydrating plant installed in Xochitepec, México. Case study: Pineapple. *Submitted to Applied Thermal Engineering*.
- Condorí M., Duran G., Echazú R., Altobelli F. (2017). Semi-industrial drying of vegetables using an array of large solar air collectors. *Energy for Sustainable Development*, 37, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.11.004>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed). John Wiley.
- Duran G. y Condorí M. (2013). Caracterización, modelo físico y simulación computacional bajo Simusol de un colector solar de aire con absorbedor ondulado y paso paralelo de aire. *Averma* 17, 3.33-3.46.
- EL-Mesery, H. S., EL-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>
- Fan, M., Zheng, W., You, S., Zhang, H., Jiang, Y., & Wu, Z. (2020). Comparison of different dynamic thermal performance prediction models for the flat-plate solar collector with a new V-corrugated absorber. *Solar Energy*, 204, 406-418. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.093>
- Fischer, S., W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, B. Perers, P. Bergquist, y B. Hellström. 2004. Collector Test Method under Quasi-Dynamic Conditions According to the European Standard EN 12975-2. *Solar Energy* 76(1-3):117-23. doi: 10.1016/j.solener.2003.07.021

- Fudholi, A., & Sopian, K. (2019). A review of solar air flat plate collector for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 333-345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.032>
- Nayak, J. K., & Amer, E. H. (2000). Experimental and theoretical evaluation of dynamic test procedures for solar flat-plate collectors. *Solar Energy*, 69(5), 377-401. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00108-0)
- Obstawski, Paweł, Tomasz Bakoń, y Dariusz Czekalski. 2020. Comparison of Solar Collector Testing Methods—Theory and Practice. *Processes* 8(11):1340. doi: 10.3390/pr8111340.
- Ortiz-Rodriguez et al. (2022). *Solar Drying Technologies: A review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large scale*.
- Osório, T., & Carvalho, M. J. (2014). Testing of solar thermal collectors under transient conditions. *Solar Energy*, 104, 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.048>
- Pankaew, P., Aumporn, O., Janjai, S., Pattarapanitchai, S., Sangsan, M., & Bala, B. K. (2020). Performance of a large-scale greenhouse solar dryer integrated with phase change material thermal storage system for drying of chili. *International Journal of Green Energy*, 17(11), 632-643. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1779074>
- Paya-Marin, M. A., Lim, J. B. P., Chen, J.-F., Lawson, R. M., & Gupta, B. S. (2015). Large scale test of a novel back-pass non-perforated unglazed solar air collector. *Renewable Energy*, 83, 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.039>
- Rojas, D., Beermann, J., Klein, S. A., Reindl, D. T. (2008). Thermal performance testing of flat-plate collectors. *Solar Energy*, 82(8), 746-757. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.001>
- Saravia, L., Echazú, R., Gramajo, C., Guerrero, F. (1983). Secado de Pimientos: Ensayos Preliminares, Construcción y Ensayo de una Planta Piloto. *8a. Reunion de Trabajo de ASADES*, 1-7.

OPEN-CIRCUIT THERMAL PERFORMANCE OF A LONG LENGTH SOLAR AIR COLLECTOR FOR INDUSTRIAL DRYING

ABSTRACT: A 9.76 m long parallel pass flow solar air heater is studied under cloudless sky operating conditions and an inlet temperature equal to the ambient temperature. Using a quasi-stationary model that considers the thermal mass of the absorber plate, a method is obtained to determine parameters related to the thermal performance of this type of heater. The instantaneous thermal efficiency as a function of time has a slightly positive slope whose average is stable for angles of incidence of solar radiation up to 30°. This average corresponds to the steady state optical efficiency of the collector. In the non-steady state, a linear relationship is obtained between the plate-ambient and outlet-ambient temperature differences, with a 98.6% fit for a flow rate of 0.19 kg/s. The thermal performance curve of the collector is obtained as a function of the air mass flow rate.

Keywords: quasi-steady model, solar air collector, thermal efficiency, solar drying.

SOFTWARE PARA EL ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TERMICO DE SISTEMAS DE CONCENTRACION SOLAR

Hugo Aparicio¹, Pablo Dellicompagni², Carlos Cadena²

¹Universidad Nacional de Salta (UNSa). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina.

aparihe@gmail.com.

²Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina. pablodellicompagni@gmail.com.

RESUMEN: Se desarrolló una herramienta numérica con el objetivo de aportar una opción práctica de simulación del comportamiento de los sistemas de concentración solar, que sea lo suficientemente flexible para que pueda ser utilizada sin grandes restricciones. Este software fue creado con lenguajes de programación de alto nivel y con las características de una página web. El programa se encarga de procesar los datos ingresados mediante las ecuaciones correspondientes a la geometría solar, el balance de energía de un sistema concentrador solar, presión, temperatura de salida, etc. Las salidas del programa presentan los valores generados para la potencia térmica, energía térmica, entre otros parámetros, de los sistemas concentradores solares. Se considera que lo más destacado es la posibilidad de combinación de los datos de ingreso, ya que esto contribuye a simular una gran cantidad de escenarios lo que resulta de un gran aporte a la hora de la toma de decisiones en cuanto a las características de tamaño, eficiencia, pérdidas de calor, etc., que debe tener un equipo de concentración solar.

Palabras claves: concentración solar, simulación numérica, herramienta, toma de decisiones.

INTRODUCCION

Entre los recursos utilizados como generadores de energía tenemos las llamadas energías renovables. Y entre otras a considerar, tenemos a la energía solar, el sol provee a la tierra todos los días de una gran cantidad de energía que se debe aprovechar. El ser humano a desarrollado algunas tecnologías para el aprovechamiento de la energía procedente del sol. Una de ellas es la tecnología de concentración solar que aprovecha la irradiación solar para transformarla en energía térmica. De forma paralela a los desarrollos tecnológicos, la informática se constituye en una ciencia soporte para prácticamente todo tipo de investigación y consecuentemente también para el estudio del aprovechamiento tecnológico de las energías renovables. Actualmente hay una gran cantidad de programas informáticos que se utilizan para la evaluación, cálculo y diseño de sistemas para la generación de energía a través de la radiación solar. Entre los más usados podemos mencionar: System Advisor Model (SAM), TRNSys y PVSyst.

El programa SAM (SAM, 2020; Blair et al., 2014) permite llevar adelante gran cantidad de cálculos relacionados con sistemas que se usan para producir energías a través de las energías renovables. Se pueden simular con este software sistemas fotovoltaicos, de concentración solar y eólicos entre otros. Cuenta con una gran cantidad de opciones de uso y muestra como salida un extenso volumen de información. Para su utilización, permite elegir entre algunos modelos de equipos comerciales y en razón de esta elección se ajustan los parámetros o valores para la simulación. Muchos de los valores se encuentran puestos por defecto. Tiene algunas restricciones en este sentido, solo se pueden simular equipos comerciales y predefinidos que ya vienen para ser utilizados por defecto por el programa, algunos valores de ingreso no dan todas las opciones sino solo las que los diseñadores del software definieron. Utiliza además para los cálculos una planilla Excel con gran cantidad de información y del mismo modo genera una gran cantidad de gráficos.

TRNSys (Almeida et al., 2014; Remlaoui et al., 2018) es un software de simulación energética, que sirve para el cálculo de los llamados procesos transitorios o cambiantes en los sistemas. Es capaz de evaluar además de la generación de energía, diferentes tipos de procesos como ser tráfico de vehículos y procesos de tipo biológico. TRNSys está constituido de dos partes. La primera parte es un motor (llamado kernel) que lee y procesa los archivos de entrada, resuelve iterativamente, determina las convergencias y grafica las variables del sistema. También entrega otras utilidades. La segunda parte es una biblioteca de componentes que modelan el rendimiento de una parte del sistema cada uno. Permite el agregado de componentes propios a quienes tengan experiencia en programación o codificación y en la construcción de algoritmos. Estos algoritmos se pueden agregar luego como parte del software TRNSys, para ello es necesario contar con conocimientos básicos en los lenguajes de programación C++, Delfi y Fortran. Esta característica significa que este programa cambiara de versión a medida que se le agreguen componentes. Se utiliza para Simulación de Edificios, Geotermia, Sistemas Solares y Eólicos entre varios más.

En un contexto regional, en Argentina no existen proyectos finalizados con respecto a energía solar térmica de concentración, mas allá de los proyectos realizados por el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), principalmente sistemas de concentración cilindroparabólico, heliostatos de concentración y Fresnel lineal (Dellicompagni y Franco, 2019; Placco et al., 2019;) y el Laboratorio de Óptica, Calibraciones y Ensayos (LOCE), basados en tecnología cilindroparabólica y disco parabólica (Panaroni et al., 2017, Panaroni et al., 2020). Por otro lado, empresas de referencia nacional, cómo Jujuy Energía Minería S. E. (JEMSE) e INVAP llevaron adelante estudios de factibilidad para instalar una planta solar de torre central híbrida fotovoltaica en la Puna jujeña con vistas de diseño, construcción y comercialización en el mercado nacional con proyección de competencia internacional (JEMSE, 2021). El interés por las tecnologías de concentración solar se ve reflejado tanto en el sector académico cómo en el sector privado que, si bien no ha alcanzado un grado de madurez nacional relativamente alto, sigue a la tendencia global hacia la inserción de estas tecnologías en diferentes ámbitos como ser residencial e industrial, para el abastecimiento de calor de climatización y procesos (IEA, 2023). De lo precedente, resulta necesario contar con herramientas de calculo y prediseño que se adapte a la necesidad de conocer las posibilidades de abastecimiento de energía térmica en el sector productivo y residencial, y que a la vez sean de fácil uso en conjunción con el diseño sencillo en su arquitectura, pero de alta confiabilidad en cuanto a los resultados.

En el presente trabajo se muestran las características de un software de cálculo y prediseño de sistemas de concentración solar cilindroparabólico, y que tiene como objetivo servir a los usuarios como una herramienta más a las que ya están en uso. En este estado de desarrollo, el software se emplea para calcular la potencia térmica, la energía térmica, la temperatura y la presión que puede producir como salida un concentrador cilindroparabólico. El programa pretende ser un poco más flexible que otros softwares que se utilizan en el campo de energía solar, con el fin de que se puedan ingresar valores de prueba, prácticamente sin restricción y que no esté sujeto solo a equipos predeterminados. Se presentan en este trabajo las consideraciones que se tomaron en cuenta para realizar el desarrollo del software, las pruebas, los datos que se utilizaron y se muestran los resultados y las conclusiones a las que se arribaron.

METODOLOGIA

En primer lugar, se definió el modelo termofísico con el cual se trabajó, seleccionando las variables de entradas necesarias en función de los resultados a los cuales se desea arribar. Se plantearon la ecuación general de balance energético, cómo así la determinación de las variables solares siguiendo las ecuaciones de geometría solar descritas en la bibliografía. Seguidamente, se optó por desarrollar el software en un contorno web que permitiera trabajar directamente en línea sin necesidad de instalar ninguna herramienta adicional en el computador. Para ello se emplearon lenguajes cómo HTLM, PHP y CSS. Se corre el programa en dos oportunidades. La primera a modo de validación cotejando los resultados numéricos con mediciones experimentales. La segunda, se plantean dos escenarios de generación de energía térmica para dos caudales fijos.

Variables para el calculo

Se determinaron las variables físicas que intervienen en el proceso de captación de energía solar por medio de un concentrador cilindroparabólico. En este orden, determinar el modelo termodinámico de un concentrador cilindroparabólico requiere contar con un balance energético (Ec. 1) del sistema formado por el concentrador solar propiamente dicho y el tubo absorbedor. Se tiene que el calor útil aprovechable resulta de descontar a la ganancia solar las pérdidas hacia el ambiente.

$$\dot{m} * C_p * (T_s - T_e) = \eta * DNI * A_{con} * K(\theta) - U * A_{abs} * (T_s - T_a) \quad (1)$$

Donde:

- \dot{m} : Flujo másico, kg/s.
- C_p : Calor Especifico, J/kg °C.
- T_s : Temperatura de salida, °C.
- T_e : Temperatura de entrada, °C.
- η : Eficiencia óptica, adimensional.
- DNI: Irradiancia normal directa, W/m².
- A_{con} : Área concentrador, m².
- $K(\theta)$: Modificador del ángulo de incidencia, adimensional.
- U : Coeficiente global de pérdidas, W/°Cm².
- A_{abs} : Área absorbedor, m².
- T_a : Temperatura ambiente, °C.

La Fig. 1 muestra el esquema general de un concentrador cilindroparabólico adoptado para la determinación del calor útil (potencia térmica) según la Ec. 1. El fluido ingresa al absorbedor con una temperatura T_e y egresa del mismo con T_s . El caudal másico \dot{m} puede ser fijo o variable. No obstante, en el presente trabajo se considera fijo. Por otro lado, el ángulo de incidencia solar θ se lo determina mediante las ecuaciones de geometría solar establecidas en Duffie y Beckman (2013) y Berman et al. (2011), cómo así también la inclinación β que depende fundamentalmente de la altura solar proyectada en el plano N-S. La orientación del concentrador, es decir el ángulo azimutal γ es de 180°, orientado hacia el norte.

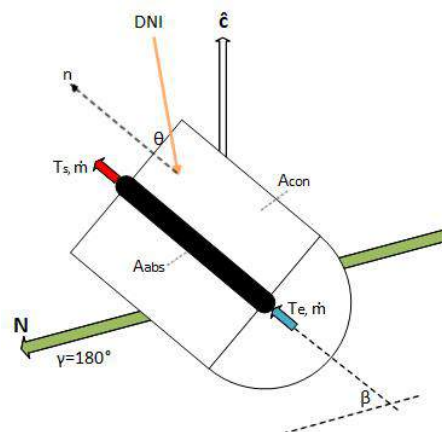


Figura 1: Esquema de concentrador solar cilindro-parabólico.

Descripción del software

El software tiene como objetivo principal servir de apoyo o de soporte a las tecnologías de concentración solar, permitiendo generar resultados útiles con respecto al desempeño de estos sistemas. Brinda la posibilidad de poder comparar distintos resultados de acuerdo a diferentes datos de entrada sin la necesidad de tener que contar para ello con el dispositivo físico de concentración solar. Representa, asimismo, una significativa ventaja al momento de diseñar una planta de generación de energía por concentración solar, ya que con solo ingresar los valores o parámetros convenientes se podrán tener los resultados representativos del desempeño de los equipos que se pretendan usar y el tamaño necesario que deberán tener los mismos.

El programa informático que se codificó para probar el desempeño de un concentrador cilindroparabólico se hizo utilizando lenguajes de programación de alto nivel y del lado del servidor. Esto último significa que el programa no corre directamente en la PC personal del usuario sino en un servidor remoto. A este servidor se accede por medio de internet y desde cualquier lugar físico siempre que haya conexión a la red y se cuente con una computadora (o cualquier otro dispositivo con conexión a Internet) para tal fin. Se hizo de esta forma porque se pensó en un software con las características de una página web que estuviera al alcance de cualquiera que lo necesitara. En este sentido los lenguajes principales sobre los que se construyó el programa fueron: HTML, PHP y CSS.

HTML es el marco de una página web, se denomina lenguaje de hipertextos, común para todo sitio web, siendo éste el marco empleado por excelencia. En PHP se desarrollaron los algoritmos que se necesitan para mostrar los resultados térmicos de un colector cilindroparabólico. Existen otras herramientas como ser Python, Java, Ruby, pero se optó por PHP dada su facilidad de implementación a los fines del software aquí presentado. Además, PHP es un lenguaje exclusivo para su uso en servidores, mientras que Python y demás se emplean mayormente del lado “cliente”. CSS (del inglés hoja de estilo en cascada) es un complemento de HTML y permite, mediante múltiples opciones gráficas y de diseño, ajustar el diseño del software generando una interfaz conveniente. Tanto HTML, PHP y CSS son de código abierto. Para la generación de los gráficos se utilizó la librería gráfica `chart.js`, esta es una librería desarrollada en JavaScript. Es muy práctica y es de código abierto, posee innumerables tipos de gráficas y de opciones de programación para incluir en cualquier proyecto donde se necesite contar con gráficos. También fue necesario contar con `PhpSpreadSheet`, que es también una biblioteca de código abierto, que incluye un conjunto de clases que permiten interactuar y utilizar varios formatos de archivo de hoja de cálculo como Excel de Microsoft. Una clase es una característica de los lenguajes de programación orientada a objeto, en este tipo de lenguajes todo lo que constituye el mundo real es un objeto (ya sea físico o conceptual). Un objeto tiene sus propias características: nombre, atributos y comportamiento. Un objeto se crea a instancias de una clase. Es decir, cuando se programa orientado a objeto, primero se declara una clase (con nombre, atributos y comportamiento) y luego se crea (si se necesita) un objeto de esa clase. Es decir, un objeto es una instancia de alguna clase que hereda todas las características de la clase (de la cual es una instancia).

El desarrollo del programa incorpora las ecuaciones relativas a la geometría solar (Duffie and Beckman, 2013) para realizar los cálculos de la posición del sol en determinadas horas coincidentes con las horas de control de la irradiancia normal directa incidiendo sobre el plano de apertura del concentrador cilindroparabólico. El software en esta fase está conformado por cuatro páginas dependientes una de la otra de dos en dos. La primera es la encargada de presentar la interfaz de inicio al usuario, donde se ingresará la información que se solicita para su procesamiento. Un formulario HTML, conformado por distintas opciones de ingreso de información, es el encargado de recibir y transferir los datos de entrada a los algoritmos que se encuentran en la segunda página que es la encargada de procesar los datos. El software presenta en esta etapa, dos opciones de cálculo: 1) Realizar los cálculos usando información y datos recolectados en un día en particular y 2) Realizar los cálculos usando información y datos recolectados en un mes completo en particular. En el primero de los casos desarrollado se solicita elegir el mes y el día. Estos datos de día y mes son necesarios para el cálculo del ángulo de declinación (δ) del sol, lo que posteriormente será utilizado para el cálculo del ángulo de incidencia (θ) de los rayos solares sobre la superficie dada y finalmente de esta manera se determina el índice modificador del ángulo de incidencia $K(\theta)$. La Fig. 2 muestra los formularios de datos de entrada para el cálculo de un día de generación térmica y para un mes completo.

Figura 2: Formulario web para el ingreso de datos de entrada. Izq.: para un único día de cálculo. Der.: para un mes completo. Para ambos formularios, el caudal másico puede ser seteado como constante (para lo cual el usuario deberá definir su valor), o bien como variable, para lo cual se deberá incorporar los datos horarios de caudal en la planilla Excel.

La solicitud de ingreso de la información de la localidad es en razón de que a ese sitio corresponderán los datos de irradiancia normal directa, temperatura ambiente, caudal másico y hora a la que se tomaron los datos para ser procesados por los algoritmos. Como los datos ingresados de hora corresponden a la hora reloj y los ángulos de la geometría solar están relacionados con la hora solar, corresponde hacer un ajuste entre ambas horas. Para ello y para saber cuan desfasados se hallan la hora reloj y la hora solar se utiliza el algoritmo de la Ec. 2 que relaciona ambas horas (Duffie and Beckman, 2013; Berman et al., 2011).

$$HSE = HSL - 4 * (L_s - L_e) - E_t \quad (2)$$

Donde:

HSE: Hora solar estándar, horas decimales.

HSL: Hora solar local, horas decimales.

L_s : Longitud del meridiano estándar, grados decimales.

L_e : Longitud del meridiano del lugar, grados decimales.

E_t : Ecuación del tiempo, horas decimales.

Un algoritmo calcula la ecuación del tiempo teniendo en cuenta entre otras cosas el número de orden del día del año, y con este dato finalmente se determina el tiempo que hay de diferencia entre la hora solar y la hora reloj. Entonces el programa determina el ángulo horario a la puesta del sol (Ec. 3).

$$\cos\omega_s = (-\sin\delta * \sin\Phi) / (\cos\delta * \cos\Phi) \quad (3)$$

Siendo δ la declinación solar y Φ la latitud. Luego se determina la hora de puesta del sol (Ec. 4).

$$h_{ps} = 12 + \omega_s / 15 \quad (4)$$

A la hora de puesta del sol el programa adiciona la diferencia encontrada anteriormente cuando se calcula la relación entre la hora reloj y la hora solar y así se obtiene la hora reloj de puesta del sol y también se determina el ángulo horario de puesta del sol a esa hora. De esta forma el software creado lleva adelante todos los cálculos necesarios para finalmente dar como salida la potencia térmica generada por un concentrador cilindroparabólico de forma horaria. Para ello el siguiente paso es conocer la hora de salida del sol mediante la Ec. 5.

$$h_{ss} = 12 - \omega_s/15 \quad (5)$$

También aquí el código del programa suma la diferencia mencionada en los párrafos anteriores a la hora de salida del sol calculada y de esta manera se tiene la hora reloj de salida del sol. Luego, el algoritmo lleva la hora de puesta del sol a su valor entero menor más cercano y la hora de salida del sol a su valor entero mayor más cercano. Esto se hace necesario porque las mediciones de irradiancia normal directa solar se toman a horas enteras y porque no se conoce cuantas horas de medición por día serán necesario procesar. Por eso se determina la hora entera de puesta del sol y la hora entera de salida del sol más próxima a su valor real.

Haciendo retroceder la hora (entera) de puesta del sol iterativamente, restándole el valor 1 hasta que coincida con la hora (entera) de salida del sol y a su vez restando iterativamente al ángulo de puesta del sol el valor 15, finalmente tenemos la hora reloj de salida del sol junto con el ángulo horario del sol a esa hora (hora entera). El código posee en su estructura un algoritmo mediante el cual se determinan los ángulos horarios para cada hora correspondiente a la medición de irradiancia normal directa que se ingresó para su procesamiento. El archivo Excel al que se hace mención en el formulario de ingreso de datos, debe contener la información de la hora a la que se midió la DNI, los datos de la DNI medidas y la temperatura ambiente y el caudal másico a las mismas horas. Con estos datos el programa procederá a calcular el desempeño de un concentrador cilindroparabólico. El programa se ejecutará sin ningún tipo de restricciones, solo es necesario ingresar los valores que se deseen probar, estos valores son factibles de cambio libremente y el software mostrará los resultados del desempeño del sistema de concentración solar.

Para el caso de cálculo mensual se utiliza un formulario de ingreso similar al que se mostró en la Fig. 1. Ya no se pide que se indique el día puesto que se realizan los cálculos para todo el mes, también en este caso los valores de ingreso no están sujetos a ningún tipo de condición, salvo la coherencia que deben tener los valores de prueba a fin de obtener resultados razonables.

En cuanto a la determinación de la presión de salida, el programa calcula en primer lugar la temperatura de ebullición en razón de la altura sobre el nivel del mar (asnm), con la Ec. 6 (Negret, 1986; Güemez et al., 2002).

$$T_e = -0,0034 * (asnm) + 99,884 \quad (6)$$

Luego la presión atmosférica se determina con la Ec. 7.

$$P_a = -0,0001 * (asnm) + 0,9967 \quad (7)$$

Las Ecs. 6 y 7 fueron generadas mediante regresiones lineales a partir de las dependencias con la altura sobre el nivel del mar tanto de la temperatura de ebullición como la presión atmosférica. Si la temperatura de salida (T_s) es igual o menor a la temperatura de ebullición previamente calculada, entonces la presión de salida (P_s) es igual a la presión atmosférica, en bar. Si la temperatura de salida (T_s) es mayor a la temperatura de ebullición previamente calculada, entonces la presión de salida (P_s) se calcula con la Ec. 8, que es un polinomio de sexto orden confeccionado a partir de las tablas de vapor de agua saturado.

$$P_s = 2 \times 10^{-14} (T_s)^6 - 2 \times 10^{-11} (T_s)^5 + 2 \times 10^{-8} (T_s)^4 - 2 \times 10^{-6} (T_s)^3 + 3 \times 10^{-4} (T_s)^2 - 6.2 \times 10^{-4} (T_s) + 0,0538 \quad (8)$$

Por último, se emplea la Ec. 9 para determinar el índice modificador del ángulo de incidencia θ (Balado, 2011).

$$K(\theta) = \cos(\theta) - (2,859621 * 10^{-5} * \theta^2) - (5,25097 * 10^{-4} * \theta) \quad (9)$$

Datos utilizados para la validación del software

Para la validación experimental del modelo aquí propuesto se empleó un concentrador cilindroparabólico cuyo absorbedor presenta una longitud de 6 m y un área de apertura de 11 m² (Fig. 3). El mismo se construyó en el campus experimental del INENCO de la Universidad Nacional de Salta. Orientado hacia el norte y con seguimiento solar en la dirección de la altura solar, es decir, con eje Este-Oeste. El caudal másico de ingreso fue variable dado que el equipo se conecta directamente a la red.



Figura 3: Equipo concentrador cilindroparabólico tomado como caso de estudio. Superficie reflectora de aluminio pulido espejo, absorbedor metálico y cubierta transparente de borosilicato.

La información que se requiere para correr el programa y comprobar su desempeño es la referida a la ubicación geográfica de la localidad, como así también otros datos con respecto al tamaño del sistema cilindroparabólico y datos específicos de operación, que son ingresados en el formulario de entrada de la Fig. 2 (izq.). A continuación, se listan los valores de los parámetros de prueba.

- a. Área de apertura del concentrador $A_{con} = 11 \text{ m}^2$.
- b. Área del absorbedor $A_{abs} = 0.623 \text{ m}^2$.
- c. Eficiencia óptica $\eta = 0.4$.
- d. El coeficiente de pérdidas del tubo absorbedor $U = 50 \text{ W m}^2\text{°C}$.
- e. Angulo azimut: 180° .
- f. Temperatura de entrada: 25°C .
- g. Calor específico: $4185 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$.
- h. Flujo másico: configurado cómo variable.

El valor correspondiente al coeficiente de perdidas U es un valor tomado de manera aleatoria, que no corresponde a absorbedores comerciales específicos, sino más bien a concentradores de una fabricación no seriada. Este valor debe ser encontrado de forma experimental, en argentina no existe un mercado de concentradores cilindroparabólicos actualmente (Dellicompagni et al., 2019).

La localidad corresponde a Salta, cuyas coordenadas son latitud -24.7286 y longitud -65.4095 . Se realizó el ensayo del equipo, con condiciones de cielo claro el día 11/9/23. Los resultados experimentales y simulados se sintetizan en la Tabla 1, con los respectivos coeficientes de determinación para la temperatura de salida y la potencia térmica desarrollada. Cabe mencionar que se tomaron 3 puntos de medición una vez pasado el régimen transitorio de arranque y calentamiento del equipo, abarcando la franja horaria alrededor del medio día solar. Las temperaturas de entrada, salida y ambiente se midieron empleando termocuplas tipo k, cuyas señales se registraron mediante un datalogger Digisense[®] de doce canales (error de medición: 0.1°C). El caudal másico se midió con un caudalímetro Arduino tipo turbina modelo YF-S401 y su señal se procesó mediante una placa Arduino UNO (error de medición: 10^{-3} kg/s).

los valores de DNI se obtuvieron mediante un pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1 (error de medición: 2%). Si bien se tomaron mediciones puntuales, los coeficientes de determinación fueron superiores al 90% comparando los valores de temperatura de salida y potencia térmica.

Tabla 1: Comparación entre valores medidos y simulados de temperatura de salida y potencia térmica.

	Variables medidas						Variables simuladas	
hora	\dot{m} (kg/s)	DNI (W/m ²)	Ta (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	Qs (W)	Ts (°C)	Qs (W)
12	0.004	969.9	29.2	27.6	110.9	1353	98.5	1316
13	0.013	974.5	32.2	25.0	80.70	2759	74.0	2728
14	0.006	956.6	37.0	28.1	106.80	1927	103.3	1947
						R ²	92.4%	99.8%

Consideraciones de la prueba

En este punto es necesario tener en cuenta las condiciones de operación para la prueba del programa desarrollado. En primer lugar y como los datos de ingreso no tienen restricciones, se corre el software con valores que no representan específicamente a algún sistema comercial en particular. Los datos de las características del sistema concentrador no están tomados de manera predeterminada de ninguna planta de energía solar ni de ningún equipo de concentración solar, es decir, no se pensó en ningún equipo concentrador solar conocido previamente. En esta etapa se simula sin restricciones en cuanto a determinados sistemas de concentración para demostrar la versatilidad y flexibilidad del programa en cuanto a su ejecución.

La localidad elegida para correr el programa es General Güemes en la provincia de Salta, Argentina. Esta localidad tiene como coordenadas geográficas: Latitud -24.6682 y Longitud 65.0482. Los datos de DNI con los cuales se simuló corresponden al mes de enero del 2021 habiéndose obtenido los datos climáticos del sitio Climate.OneBuilding.Org. De esta página se pueden descargar datos del clima de algunos sitios, pero se puede utilizar cualquier página que sirva para este fin, o bien emplear datos medidos existentes. En particular y en este caso a la información que se descarga hay que transformarla al formato CSV (valores separados por coma) para de esta forma poder editarla como un archivo Excel. En realidad, el archivo comprimido que se descarga de Climate.OneBuilding.Org contiene una gran cantidad de información, para la finalidad del uso del software solo interesan, para calcular el desempeño térmico por día, la hora, el valor de DNI y de temperatura ambiente. En caso de que se quiera calcular un mes completo se deben agregar a los datos también el día del mes de cálculo, es decir la fecha

Con esta información se crea un archivo simple, no siendo necesaria la primera fila el nombre de los datos, conteniendo la primera columna la hora, en la segunda columna la temperatura ambiente, en la tercera columna los datos de DNI y en la cuarta columna los datos de caudal. Si se trata de un mes completo en la primera columna debe incluirse el día del mes. El programa se probó utilizando como fluido caloportador agua, cuyo calor específico se considera igual a 4185 J/Kg °C. También se debe hacer mención que el sistema de concentrador cilindroparabólico está orientado mirando al norte, desde el hemisferio sur, y solo tendrá seguimiento en un eje, es decir, solo seguirá la posición del sol en altura. Pero también es factible que se oriente mirando al sur desde el hemisferio norte o darle cualquier otra orientación, ya que al ángulo azimut es un parámetro de entrada en el programa y como tal puede hacerse variar.

RESULTADOS

En primer término, se corrió el programa con datos para la localidad de General Güemes de la provincia de Salta, que se tomaron el día 19 de enero del año 2021. Se utilizó para la simulación una temperatura de entrada 30°C, apertura de 60 m², área de absorbedor 4.5 m², eficiencia óptica 0.8 y caudal constante. Con respecto a esto último, se hicieron dos simulaciones para dos caudales diferentes: 0.01 kg/s y 0.05 kg/s (Tablas 2 y 3).

Tabla 2: resultados horarios de la simulación con agua como fluido caloportador y caudal másico de 0.01 kg/s, para el día 19/1/2021.

Hora	T. salida (°C)	P. térmica (W)	E. térmica (kWh)	Presión (bar)
9	-10.42	-1691	-1.69	0.93
10	62.01	1339	1.34	0.93
11	133.44	4327	4.33	3.05
12	184.28	6455	6.46	9.92
13	205.96	7362	7.36	15.4
14	175.29	6078	6.08	8.18
15	112.85	3466	3.47	1.78
16	72.47	1776	1.78	0.93
17	48.28	764	0.76	0.93
18	14.46	-650	-0.65	0.93

Tabla 3: resultados horarios de la simulación con agua como fluido caloportador y caudal másico de 0.05 kg/s, para el día 19/1/2021.

Hora	T. salida (°C)	P. térmica (W)	E. térmica (kWh)	Presión (bar)
9	5.11	-5206	-5.21	0.93
10	49.71	4123	4.12	0.93
11	93.69	13323	13.32	0.93
12	125	19874	19.87	2.46
13	138.35	22666	22.67	3.45
14	119.46	18715	18.72	2.12
15	81.02	10673	10.67	0.93
16	56.15	5470	5.47	0.93
17	41.26	2355	2.36	0.93
18	20.43	-2002	-2.00	0.93

Asimismo, el programa de simulación arroja gráficos correspondientes a las variables de salida. Los resultados que se obtuvieron para la potencia térmica generada utilizando agua como fluido caloportador y un flujo másico de 0.01 kg/s y 0.05 kg/s, se muestran en la Fig. 4.

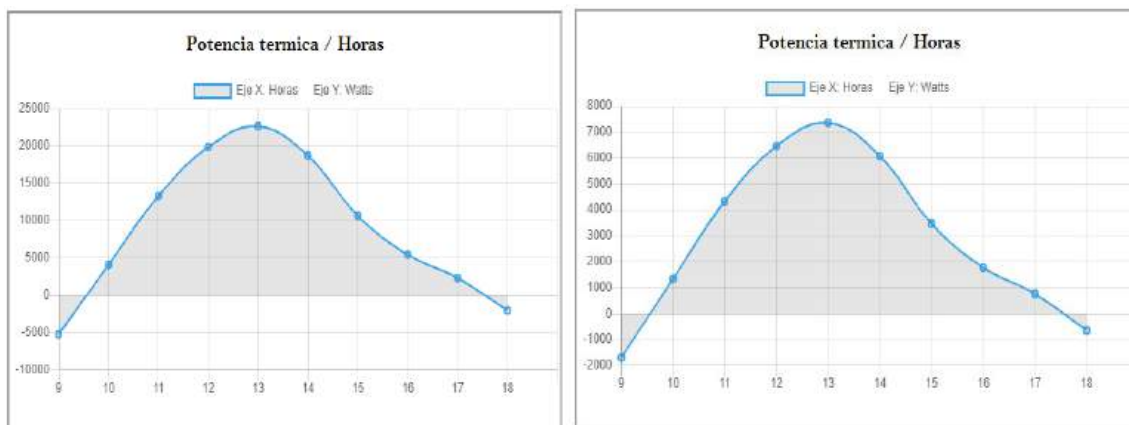


Figura 4: Potencia térmica para el día 19/1/21, con agua como fluido caloportador y caudal másico de 0.01 kg/s (izq.) y 0.05 kg/s (der.).

Luego se realizó otra prueba utilizando datos correspondientes a la misma localidad de General Güemes, pero para el mes de febrero del año 2021. La temperatura de entrada utilizada es de 20°C. Los datos correspondientes al mes de febrero fueron tomados entre las 10:00 horas y las 14:00, es decir que se tomaron cinco datos por día, definiendo así un rango horario de trabajo fijo. La Fig. 5 muestra como presenta la interfaz del programa los resultados numéricos de la simulación, para un flujo másico de 0.01 kg/s, mientras que las Figs. 6 y 7 muestran específicamente la potencia térmica generada durante todo el mes, para caudal másico de 0.01 kg/s y 0.05 kg/s, respectivamente.

DIA	HORA	T SAL (°C)	P TERM (W)	E TERM (kWh)	PRESION (bar)
1	10	43.96	1002	1	0.93
1	11	80.56	2533	2.53	0.93
1	12	106.59	3622	3.62	1.5
1	13	113.5	3912	3.91	1.81
1	14	66.92	1963	1.96	0.93
2	10	27.11	297	0.3	0.93
2	11	46.17	1094	1.09	0.93
2	12	68.61	2033	2.03	0.93
2	13	71.82	2168	2.17	0.93
2	14	82.33	2607	2.61	0.93
3	10	42.07	923	0.92	0.93
3	11	80.78	2543	2.54	0.93
3	12	119.13	4147	4.15	2.11
3	13	134.55	4792	4.79	3.13
3	14	86.73	2791	2.79	0.93
4	10	51.78	1329	1.33	0.93

Figura 5: Resultados de desempeño térmico para febrero de 2023.

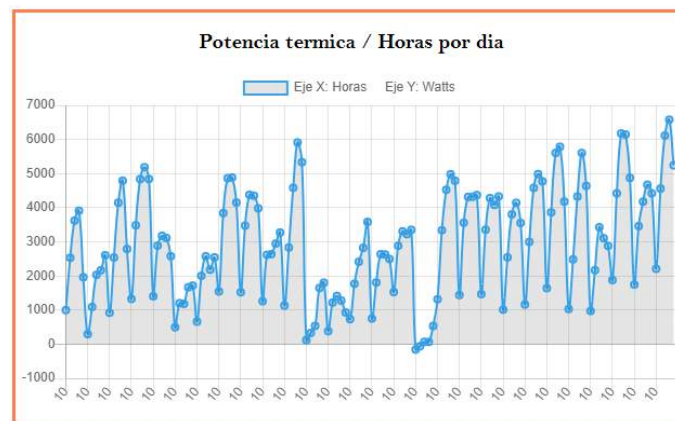


Figura 6: Resultados de potencia térmica para febrero de 2023. caudal másico de 0.01 kg/s.



Figura 7: Resultados de potencia térmica para febrero de 2023. caudal másico de 0.05 kg/s.

Estas corridas del programa utilizando datos tomados durante todo un mes. generan gráficas que presentan en el eje x el valor correspondiente a la primera hora en que se tomó el dato. en nuestro caso la primera hora en que se registraron los datos del día es la hora 10:00. Cada valor 10 representa un día y cada nodo sobre la línea del grafico representa la hora siguiente de toma de datos 10. 11. 12. 13. 14 y luego el siguiente valor 10 es la primera hora de toma de datos del día siguiente. Es decir que el primer valor 10. es el día 1. y el ultimo valor 10 es el día 28.

Se observa que los máximos valores de temperatura de salida, potencia térmica y vapor de salida se consiguieron generalmente a las 13:00 horas, esto coincide con la hora 12 solar, es decir cuando el sol se encuentra en su mayor altura. En los casos que se simuló un día de datos. cuando se utilizó un flujo másico de 0.01 kg/s se obtuvo la temperatura de salida igual a 205.96 °C, la potencia térmica igual a 7632 W y la presión igual a 1.4 bar. Cuando se aumentó el flujo másico igual a 0.05 kg/s la temperatura de salida generada fue de 138.35 °C, la potencia térmica igual a 22666 W y la presión igual a 3.45 bar.

Cuando se simuló con datos de un mes completo, también se muestran en los gráficos, que para el caso del flujo másico igual 0.01 kg/s la potencia térmica está en el orden de casi 7000 W, pero cuando se incrementó el flujo másico a 0.05 kg/s la potencia térmica supera los 20000 W.

CONCLUSIONES

Las simulaciones de la performance térmica de un concentrador cilindroparabólico con el software que se describe en este artículo cumplieron con el objetivo en cuanto a su versatilidad y flexibilidad. El programa puede generar resultados diversos, no estando restringido al cálculo de una variable única. Es confiable ya que no presenta como resultado ningún valor que se pueda considerar anómalo, pues los resultados numéricos son producto de los parámetros que se ingresan y del procesamiento que de ellos hacen los algoritmos. También resulta flexible, puesto que admite cualquier valor siempre que tenga que ver con la materia que se está tratando.

Para una simulación de un día, se observa que, cuando se aumenta el flujo másico:

- 1) En general disminuye la temperatura de salida.
- 2) En general aumenta la potencia térmica.
- 3) Disminuye la presión.

Similar comportamiento se observa cuando la simulación se realiza para un mes completo. Los resultados a los que se arriban sirven para tomar las decisiones a la hora de definir bajo qué condiciones un sistema de concentración solar debe trabajar, de manera de conseguir la mejor prestación posible dentro de los límites reales de funcionamiento. En estas simulaciones solo se hizo variar un parámetro de entrada (caudal másico), siendo posible otras combinaciones como ser utilizando distintas áreas de superficie concentradora o de superficie absorbidora. De esta forma cambiando distintos parámetros de ingreso como por ejemplo el coeficiente global de pérdida, la eficiencia óptica, etc., se pueden obtener diferentes resultados que son materia de análisis en busca de una mayor eficiencia del sistema.

El programa tiene una característica muy valiosa y de gran practicidad y ayuda para la investigación. Se pueden realizar las todas las pruebas que se necesiten llevar adelante y hacerlos con los valores de entrada que se requieran. A futuro, estará disponible como una página web para quien la necesite, no siendo necesaria su descarga y/o instalación. Solo será necesario emplear el dispositivo conectado a internet, colocar la dirección URL en el navegador y contar con un archivo Excel con los datos a procesar. Se podrán obtener los resultados de múltiples combinaciones de parámetros de entrada para los casos de tomas de decisiones.

Por último, y también de carácter de trabajo futuro, se seguirá en el desarrollo y ajuste de los modelos y algoritmos mediante validación experimental exhaustiva. Para ello, en el INENCO se dispone de un concentrador cilindroparabólico de 6 m de largo con área de apertura de aproximadamente 11 m², correspondiente a un proyecto del tipo PICT denominado *Generación de energía térmica con tecnología de concentración solar cilindro parabólica para procesos industriales en la región NOA*. La validación realizada hasta el momento se encuentra en su fase inicial, por lo que esto podría representar una limitación no de uso, sino en la confiabilidad de los resultados según el criterio del usuario. Por otro lado, el software no contempla las pérdidas ocasionadas por desenfoque debido a deformaciones en las estructuras como así en las superficies reflectoras de los haces solares.

REFERENCIAS

- Almeida P., Carvalho M. J., Amorim R., Mendes J. F., Lopes V. (2014). Dynamic testing of systems – Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy* Volume 104. Pages 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.010>.
- Balado E. (2011). Prototipo de campo de colectores solares cilindro-parabólicos para generación de calor a alta temperatura. Proyecto final de carrera Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/12857>.

- Berman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P. and Dewitt D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Jhon Wiley and Sons. 2011. ISBN 13 978-0470-50197-9.
- Blair N., Dobos A., Freeman J., Neises T., Wagner M., Ferguson T., Gilman P., Janzou S. (2014). System Advisor Model. SAM 2014.1.14: General Description. NREL/TP-6A20-61019. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. www.nrel.gov/docs/fy14osti/61019.pdf.
- Dellicompagni P., Franco J. (2019). Potential uses of a prototype linear Fresnel concentration system. *Renewable Energy*. Volume 136, Pages 1044-1054. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.005>.
- Dellicompagni P., Franco J., Flexer V. (2019). CO2 Emission Reduction by Integrating Concentrating Solar Power into Lithium Mining. *Energy Fuels* 2021. 35. 19. 15879–15893. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01951>.
- Duffie, J. A. y Beckman W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Güemez J., Fiolhais C., Fiolhais M. Revisiting Black's experiments on the latent heats of water. *The Physics Teacher* Vol 40. January 2002. pp. 26-31. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1457825>.
- International Energy Agency – IEA. (2023). *Renewable Energy Market Update. Outlook for 2023 and 2024*. Reporte accesible en www.iea.org. Ultimo acceso: 30 de marzo de 2023.
- JEMSE. (2021). Artículo: JEMSE proyecta construir y vender usinas híbridas con INVAP. Disponible en <https://jemse.gob.ar/2021/04/29/jemse-proyecta-construir-y-vender-usinas-hibridas-con-invap/>, ultimo acceso: 30 de marzo de 2023.
- Negret J. P. Boiling Water and the Height of Mountains. *The Physics Teacher*. May 1986. pp. 290-292. <http://dx.doi.org/10.1119/1.2342018>.
- Panaroni D., Castro Luna A., Martorelli L. (2020). Obtención de la eficiencia óptica de un disco parabólico mediante método SHOT modificado. *AJEA – Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTNV. Jornadas de Intercambio y Difusión de los Resultados de Investigaciones de los Doctorandos en Ingeniería*. ISBN: 978-950-42-0200-4. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.684.2020>.
- Panaroni D., Mujica M., Abal Matos M., Corujo L., Cervini F., Castro Luna A., Martorelli L. (2017). Diseño óptico de un colector cilíndrico parabólico inclinado para generación directa de vapor. IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017.
- Placco C., Gea M., Casimiro R., Hongn M., Fernández C., Suligoy H., Lacuadra D. (2019). Construcción y ensayos de un helióstato de foco lineal para un horno solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 23, pp 02.45-02.56, 2019. ISSN 2314-1433.
- PVsyst (Photovoltaic software). Dirección URL: <https://www.pvsyst.com> [consulta: mayo 2023]
- Remlaoui A., Nehari D., Elmeriah A. (2018). A TRNSYS dynamic simulation model for a concentrating Solar Power Plant (CSP). JSDD 201. 1ère Journée des Structures et Développement Durable. Tissemsilt.
- Repositorio de datos climáticos gratuitos para la simulación del rendimiento de edificios. De los creadores de EPW. Dirección URL: <https://climate.onebuilding.org/> [consulta: mayo 2023].
- System Advisor Model Version 2020.11.29 (SAM 2020.11.29). National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. sam.nrel.gov. [consulta: mayo 2023].

SOFTWARE FOR THE STUDY OF THE THERMAL PERFORMANCE OF SOLAR CONCENTRATION SYSTEMS

ABSTRACT: A numerical tool was developed with the aim of providing a practical option for simulating the behavior of concentrating solar systems, which is flexible enough to be used without major restrictions. This software was created with high level programming languages with web page characteristics. The program processes the entered data using the solar geometry equations corresponding to the energy balance of a solar concentrator system, pressure, outlet temperature, etc. The outputs of the program include the values of thermal power, thermal energy, etc., of the solar concentrator systems. The possibility of combining the input data is the main strength of the software, since it helps to simulate a large number of scenarios, which is a interesting contribution for making-decisions process regarding the characteristics of size, efficiency, heat losses, etc., that a concentrating solar technology must have.

Keywords: solar concentration, numerical simulation, tool, decision making.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN CIRCUITO TÉRMICO PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL CON ENERGÍA SOLAR

R. Stoll, J. Daghero, E. Podversic, C. Capozzuca, G. Paisio

Grupo de Energía Solar. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Ruta 36. Km 601. X5804BYA – Río Cuarto. Prov. de Córdoba

Tel. 0358-46768842 e-mail: rstoll@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta la evaluación del desempeño de un circuito térmico para la generación de vapor de agua de baja entalpía destinado al uso industrial. Este circuito térmico forma parte de un sistema de captación de energía solar por medio de un concentrador cilíndrico parabólico (CCP). El circuito original fue modificado para mejorar su eficiencia energética y asegurar, con la incorporación de resistencias halógenas, una temperatura constante en el fluido térmico ante fluctuaciones de la radiación solar incidente. Se realizaron ensayos experimentales del circuito térmico sin conectarlo al CCP con el fin de evaluar las pérdidas de energía en cada uno de sus componentes. Con el sistema aislado, el fluido térmico alcanzó una temperatura del orden 150°C al ingreso del generador de vapor. El caudal de vapor generado en estado estacionario fue de 1,3 kg/h con lo cual la eficiencia térmica global fue del 60 %. De esta manera, se logró una mejora sustancial en el aprovechamiento de la energía con relación al circuito térmico original.

Palabras clave: Energía solar, concentrador cilíndrico parabólico, circuito térmico, producción de vapor.

INTRODUCCIÓN

Después del siglo XX, muchos países se han centrado en fuentes de energía renovable para la producción de energía térmica y eléctrica. El objetivo general es reducir el impacto ambiental debido al aumento del uso de combustibles fósiles. La energía solar es una de las fuentes de energía renovable más prometedoras para satisfacer la demanda energética global futura.

Existen diversos tipos de industrias, como la química, alimentaria, textil y lavanderías, que requieren energía térmica para llevar a cabo sus procesos, como la generación de vapor o agua caliente a temperaturas medias a altas, que van desde aproximadamente 100 °C a 300 °C. Para abordar esta demanda, la energía solar de concentración y en particular, el uso de concentradores cilíndrico parabólicos (CCP) se ha considerado como una alternativa verde a las fuentes convencionales de energía, brindando varias ventajas, como la reducción de costos y emisiones de gases de efecto invernadero.

La implementación de sistemas de energía solar concentrada ha emergido como un enfoque fundamental para potenciar la competitividad de la energía solar en comparación con las fuentes de energía convencionales y otras energías renovables. Los investigadores han trabajado en el desarrollo y perfeccionamiento de estas tecnologías con el objetivo de aumentar su eficiencia y accesibilidad.

Una de las motivaciones primordiales para invertir en esta tecnología radica en la seguridad energética que brinda al reducir la dependencia de los suministradores de combustibles fósiles. Al incorporar sistemas de energía solar concentrada, las industrias pueden diversificar sus fuentes de energía y disminuir su vulnerabilidad ante las variaciones en los precios y la disponibilidad de combustibles fósiles (Ktistis et al., 2013).

Además de los beneficios económicos que ofrecen, estos sistemas desempeñan un papel crucial en la mitigación del cambio climático global al reducir el consumo de combustibles fósiles y, por ende, la contaminación ambiental. Esto contribuye a crear un entorno de vida más saludable y sostenible, lo cual es especialmente relevante en un contexto en el que la conciencia sobre la protección del medio ambiente y la búsqueda de soluciones energéticas más limpias están en constante aumento.

Asimismo, la energía solar concentrada se presenta como una fuente de energía verde versátil, con aplicaciones que incluyen la extracción de componentes valiosos de materiales vegetales y biomasa residual, la deshidratación de productos agrícolas, la recuperación de agua a través de la desalinización, la descontaminación, así como la cocción y el horneado de alimentos. A pesar de estos avances, se requieren investigaciones adicionales para mejorar la eficiencia, estabilidad, fabricación y disponibilidad de estos sistemas, así como para optimizar su diseño con el fin de reducir los costos de estos sistemas (Barba et al., 2019).

Históricamente, el mercado de Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) en todo el mundo se centraba en aplicaciones que requerían temperaturas por debajo de los 100 °C, y utilizaba principalmente colectores de placa plana y colectores de tubo de vacío. El uso de concentradores cilíndricos parabólicos o sistemas Fresnel lineales para la generación de vapor destinado a la industria era poco común en el pasado. Sin embargo, en los últimos años, esta tendencia ha experimentado un cambio significativo. La creciente demanda del sector industrial ha impulsado un notable crecimiento en los proveedores de tecnología de concentración solar para generación de vapor. En el año 2022, se proyectó la implementación de al menos 30 proyectos con una capacidad total de 32,3 MW, marcando un aumento significativo en comparación con los 10 proyectos y 8 MW que se pusieron en funcionamiento en 2021. Este cambio refleja la creciente aceptación y adopción de sistemas de concentración solar en aplicaciones industriales, lo que indica una evolución positiva en la percepción y la confianza en estas tecnologías para satisfacer las necesidades energéticas de la industria a nivel global. (Solarthermalworld, 2023).

En Argentina, se han realizado estudios con CCP con aplicaciones industriales utilizando un fluido caloportador con el fin de aprovechar la energía térmica. Dri et al (2009) utilizaron un CCP en un ciclo de refrigeración por absorción. Las mediciones realizadas permitieron determinar su curva de eficiencia y deducir el coeficiente de remoción de calor y coeficiente global de pérdida del sistema de concentración. Los resultados obtenidos permitieron realizar una implementación en TRNSYS para simular el comportamiento del sistema en distintos escenarios climáticos.

El Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto ha estudiado la tecnología de concentración solar desde el año 2013, Daghero et al (2013) diseñaron un módulo de CCP replicable para ser utilizado en la generación de vapor para la extracción de aceites esenciales de plantas aromáticas y medicinales.

Posteriormente, Daghero et al (2015) evaluaron experimentalmente el rendimiento térmico del CCP de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986 (RA 91). Se determinó que el rendimiento óptico del concentrador alcanzó al 70 % siendo este valor similar al obtenido por otros autores. Este resultado confirmó que la industria regional puede desarrollar y construir este tipo de concentradores con buenos rendimientos. A partir de esta conclusión, Garnica et al (2018) diseñaron y desarrollaron un circuito térmico que permite transmitir la energía captada a un generador de vapor utilizando un fluido de transferencia térmica a base de aceite nafténico de grado alimenticio cuyo nombre comercial es Paratherm NF (Paratherm, 2023). En las evaluaciones realizadas sobre este sistema en estado estacionario el fluido térmico alcanzó una temperatura promedio de 124 °C a la salida del receptor. El salto térmico en el mismo fue de 23 °C por lo que la eficiencia del concentrador alcanzó el 67 %. El caudal de vapor generado en estado estacionario fue de 0,53 kg/h de lo cual se infirió que el rendimiento del circuito térmico fue del 19 %. Se concluyó que, si bien el concentrador tiene una muy buena eficiencia, es necesario trabajar en la optimización del circuito térmico ya que la solución tecnológica adoptada disipaba el 80 % de la energía útil colectada por el receptor afectando así al rendimiento global del sistema (Stoll et al, 2019).

Además, como parte de los objetivos planteados, el GES desarrolló un mecanismo que proporciona un movimiento azimutal al CCP. Este mecanismo consta de dos ruedas dentadas y fue construido utilizando una impresora 3D. La incorporación de un sistema de control a este mecanismo permitirá el seguimiento solar (Ortiz et al, 2022)

En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos realizados al circuito térmico que fue modificado con el objetivo de disminuir las pérdidas de calor mejorando la aislación térmica e incorporando un sistema de precalentamiento capaz de mantener la temperatura constante del fluido térmico ante fluctuaciones de la radiación solar incidente.

EL CIRCUITO TÉRMICO

Existen varias alternativas tecnológicas para generación de vapor de uso industrial mediante un CCP (Akbarzadeh & Valipour, 2018). Entre las opciones más viables tecnológicamente en la región está el uso de agua líquida que se convierte en vapor en la generación directa de vapor (GDV) y el uso de un generador de vapor (GV) en donde la energía colectada por el CCP es transferida al agua mediante un fluido térmico.

El uso de la GDV permite generar vapor directamente a través del campo solar, eliminando la necesidad de un generador de vapor y simplificando la configuración de la planta, lo que reduce los costos de inversión. En comparación con el fluido térmico, el vapor puede generarse a temperaturas más altas. También se ha encontrado que el agua/vapor tiene la máxima eficiencia global en comparación con otros fluidos. Sin embargo, el uso de agua líquida como fluido de trabajo presenta desafíos como la falta de un almacenamiento adecuado de energía térmica, la alta presión de funcionamiento, el control sofisticado debido al flujo bifásico y la alta caída de presión en la sección de sobrecalentamiento debido a la baja densidad del vapor (Ktistis et al, 2013).

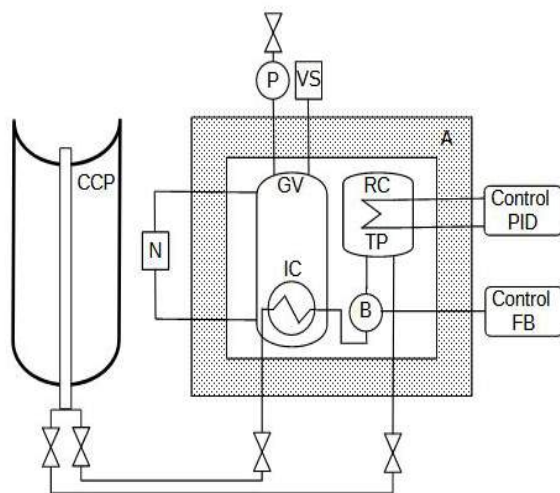
Por estas razones, el GES decidió desarrollar un GV. Se optó por utilizar un fluido térmico, cuyo nombre comercial, es Paratherm NF. Se trata de un aceite nafténico de grado alimenticio, diseñado para operar libre de mantenimiento, con alta durabilidad en sistemas cerrados de fase líquida hasta 300 °C, baja viscosidad y alto coeficiente de transferencia térmica. Las principales propiedades de este fluido se muestran en la Tabla 1 (Paratherm, 2023).

Tabla 1: Principales propiedades del fluido térmico Paratherm NF

Temperatura máxima de operación	332°C
Punto de ebullición (101kPa)	371°C
Temperatura máxima de película	343°C
Punto de inflamación Pensky-Martens (D93)	149°C
Presión de vapor en temperatura máxima de operación	17 kPa
% de expansión del volumen por encima de la temperatura máxima de operación por cada 100°C	9,9
Densidad (100°C)	831 kg/m ³
Viscosidad (100°C)	3,1 mPa-s
Calor Específico (100°C)	2,2 Kj/Kg-°K

La primera versión de este circuito térmico fue presentada en una publicación anterior (Garnica et al 2018). Debido a la baja eficiencia térmica del mismo se decidió modificarlo manteniendo los componentes principales. Se trabajó en la mejora de la aislación térmica y en la incorporación de resistencias calefactoras en el tanque pulmón (TP)

El diagrama del circuito modificado y su conexión con el CCP se muestra en la Fig. 1a. El circuito cuenta con un generador de vapor (GV) construido en acero inoxidable con intercambiador de calor (IC) con forma de serpentina por cuyo interior circula el fluido térmico. El generador está provisto de un manómetro (P), un medidor de nivel de agua (N) y una válvula de seguridad tipo resorte (VS). Entre el generador de vapor y la bomba (B) se ubica un tanque pulmón (TP) que permite contener la expansión volumétrica del fluido térmico por efecto del aumento de la temperatura. Las resistencias calefactoras (RC) incorporadas al tanque pulmón tienen la función de mantener la temperatura constante del fluido térmico a la entrada de intercambiador de calor (IC) ante cualquier fluctuación de la radiación solar incidente. El accionamiento de estas resistencias es realizado por dos relés de estado sólido que son automatizados por un dispositivo de control (CONTROL PID) tipo PID modelo N1100, marca Novus. El generador de vapor (GV), la Bomba (B) y el tanque de pulmón (TP) se encuentran en un recinto que está aislado térmicamente (A). La bomba de circulación es de tipo engranaje Marca Venturi Serie A92. La misma fue seleccionada por el bajo caudal requerido y cuenta con sellos de Viton para aumentar su resistencia a la temperatura. Esta bomba tiene un caudal máximo de 8 l/min y es accionada con un motor trifásico de 0,5 Hp. Para variar el caudal la bomba tiene incorporada en su alimentación un variador de frecuencia modelo ATV11, marca Schneider Electric, el cual permite modificar la velocidad de rotación del motor y, por ende, el caudal del fluido. En la Fig. 1b se muestra el prototipo de circuito térmico en una prueba de resistencia a presión del GV. El TP es el depósito de color rojo, debajo se aloja la B. La salida de B está conectada al IC que se encuentra en el interior del GV. Estos elementos se encuentran montados en una sección de la caja aislada (A), que tiene un recubrimiento de madera de fenólico de 10 mm de espesor y está compuesta de placas de tergopol de alta densidad de 50 mm de espesor.



(a)



(b)

Figura 1: Circuito Térmico. (a) Diagrama del Circuito Térmico acoplado al CCP y (b) prototipo de Circuito Térmico construido.

EL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CIRCUITO TÉRMICO

En la primera versión de este sistema se incorporaron dos resistencias eléctricas comerciales de 1500 vatios que son utilizadas para agua caliente sanitaria (ACS) tal como se muestra en la Fig. 2. Durante las primeras pruebas con estas resistencias se observó la generación de vapor en el TP debido a la evaporación del fluido térmico y la degradación prematura del mismo por la excesiva temperatura de las superficies de las resistencias calefactoras. Para tratar de resolver este problema se contactó al proveedor del fluido térmico quien sugirió modificar el sistema de calentamiento dado que la densidad de potencia aplicada superaba los 35 KW/m² permitidos para este tipo de fluido térmico (Chromalox, 2023). Esta información, no estaba disponible en la hoja de especificaciones técnicas del fluido térmico. Además, el proveedor recomendó mantener al TP presurizado para evitar el problema de la evaporación del fluido ya que presenta una baja presión de vapor.



Figura 2: Sistema de calentamiento con resistencias de ACS

A partir de esta situación se buscaron alternativas para precalentar el fluido. Se eligió la opción de calentarlo por medio de resistencias halógenas insertas en tubos de acero que atraviesan el TP. Estas resistencias son elementos de costo accesible y de disponibilidad en el mercado local. Se seleccionaron resistencias de 400 W ya que su longitud era adecuada para las dimensiones del TP. En la Fig. 3 se muestra el montaje realizado para evaluar el correcto funcionamiento de la resistencia halógena en un recipiente de características geométricas iguales al TP del circuito térmico



(a)



(b)

Figura 3: pruebas del sistema de calentamiento de circuito térmico construido. (a) Termocupla colocada en la superficie del cilindro calefactor y (b) Ensayo de prueba del sistema de calentamiento con resistencias halógenas

En la Fig. 3a se observa el interior del recipiente donde se colocaron tubos de 25 y 32 mm. En la Fig. 3b se observa el ensayo realizado utilizando el tubo de 25 mm.

La temperatura alcanzada por el fluido estanco fue de $180,7^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de la superficie del tubo sumergido fue de 298°C . Este valor resultó menor a 343°C , valor especificado por el fabricante como máxima temperatura de film (Paratherm, 2023). También se determinó que el flujo de calor por unidad de superficie fue de $32,8 \text{ KW/m}^2$, valor que está por debajo de la densidad de potencia máxima admisible de 35 KW/m^2 (Chromalox, 2023). Dado que estos resultados fueron satisfactorios, se decidió no realizar el ensayo con el tubo de 32 mm.

Modificación del sistema de calentamiento de circuito térmico

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos, se realizó la modificación del sistema de calentamiento. Tal como lo muestra la Fig. 4a se adosaron 4 resistencias halógenas de 400W al TP, cada una de ellas alojadas en un tubo de acero de 25 mm de diámetro soldadas al TP con una aleación de cobre-zinc. En la Fig. 4b se observa el detalle de la disposición de la resistencia halógena dentro un segmento de tubo de 25mm, la resistencia se sujeta mecánicamente mediante arandelas metálicas, por fuera de esta arandela se colocaron juntas de un material denominado cobre aislante de 2,5mm de espesor para evitar las pérdidas de calor generado por la resistencia. Para el accionamiento del sistema de calentamiento, se acoplaron eléctricamente dos resistencias halógenas en paralelo a cada uno de los dos relés de estado sólido previamente descritos. Si bien este sistema de calentamiento soluciona el problema de degradación del fluido térmico, su desempeño energético es menor que la propuesta inicial de este trabajo debido a que existe una cámara de aire como medio de transferencia de calor entre la resistencia y el fluido. Esta propuesta dificulta su evaluación experimental porque la energía consumida por las resistencias halógenas no es la misma energía que se transfiere al fluido térmico.



(a)

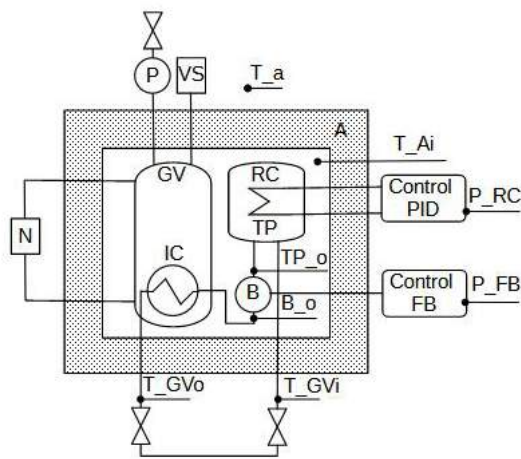


(b)

Figura 4. Modificación realizada del sistema de calentamiento en el TP. (a) El Tanque pulmón con los cuatro tubos cilíndricos soldados. (b) Detalle de la disposición de las resistencias halógenas.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL CIRCUITO TÉRMICO MODIFICADO

Con el fin de evaluar los intercambios de energía en cada uno de los componentes del circuito térmico, se realizaron ensayos experimentales sin conectarlo al CCP tal como se muestra en el esquema de la Fig. 5a. Para estos ensayos se utilizaron termocuplas calibradas tipo T, insertadas en vainas de acero inoxidable. Para mejorar la transferencia de calor entre las termocuplas y las vainas se utilizó grasa siliconada. Para la medición de la temperatura ambiente (T_a), una de las termocuplas fue colocada al reparo de cualquier fuente térmica. También se midió la temperatura dentro del recinto aislado (T_{Ai}), la temperatura del fluido térmico a la salida del tanque pulmón (TP_o), a la salida de la bomba (T_Bo), a la salida generador vapor (T_GVo), y la temperatura del fluido que retorna al tanque pulmón (T_GVi). Todas las señales se relevaron con un registrador de datos Agilent 34972A y los datos se registraron cada 30 segundos. Además, se colocaron dos vatímetros digitales monofásicos que fueron contrastados por un vatímetro digital YOKOGAWA modelo WT11. Los vatímetros digitales miden el consumo de las resistencias calefactoras (P_RC). Para determinar el caudal de vapor generado se utilizó un medidor de nivel en el GV, para ello se tomó lectura del nivel a intervalos regulares de tiempo y con la diferencia de nivel se estableció la cantidad de vapor generado. En la Fig. 5a se muestra la ubicación de las termocuplas, mientras que en la Fig. 5b se muestra una imagen del sistema ensayado con una de las tapas de aislación retiradas para mostrar el interior del habitáculo.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Esquema del circuito térmico con identificación de los sensores. (b) Imagen del sistema ensayado.

La eficiencia de estado estacionario del circuito térmico modificado se obtuvo realizando ensayos con las resistencias calefactoras accionadas, sin liberación del vapor generado. Para este ensayo se llenó el TP hasta cubrir todas las cavidades cilíndricas adosadas con 5 litros de fluido térmico. En la Fig. 7 se muestra la curva de temperatura del TP en función del tiempo.

Para evaluar el intercambio de energía en cada elemento del circuito térmico, se realizaron dos tipos de ensayos, uno de ellos se realizó sin la aislación colocada, y el otro con aislación. Los ensayos consistieron en llevar al sistema a régimen estable y luego desactivar las resistencias para dejarlo enfriar hasta una temperatura de 100°C , durante este tiempo se registraron las temperaturas en cada parte del circuito térmico.

Se determinaron los intercambios de energía en cada parte del circuito térmico con el sistema en estado estacionario. El flujo másico del fluido térmico fue fijado en $2,4 \text{ l/min}$, este valor de caudal es el que

produce una mayor remoción del calor del tubo receptor del CCP donde será utilizado este dispositivo. Las Fig. 6 y 7 muestran la evolución de las temperaturas registradas en cada parte del circuito sin aislación y con aislación térmica respectivamente. También se nota el efecto de la aislación en la temperatura máxima alcanzada por el fluido térmico y el tiempo que alcanza el régimen permanente, esta situación ocurre cuando la temperatura T_{GVo} se mantiene constante.

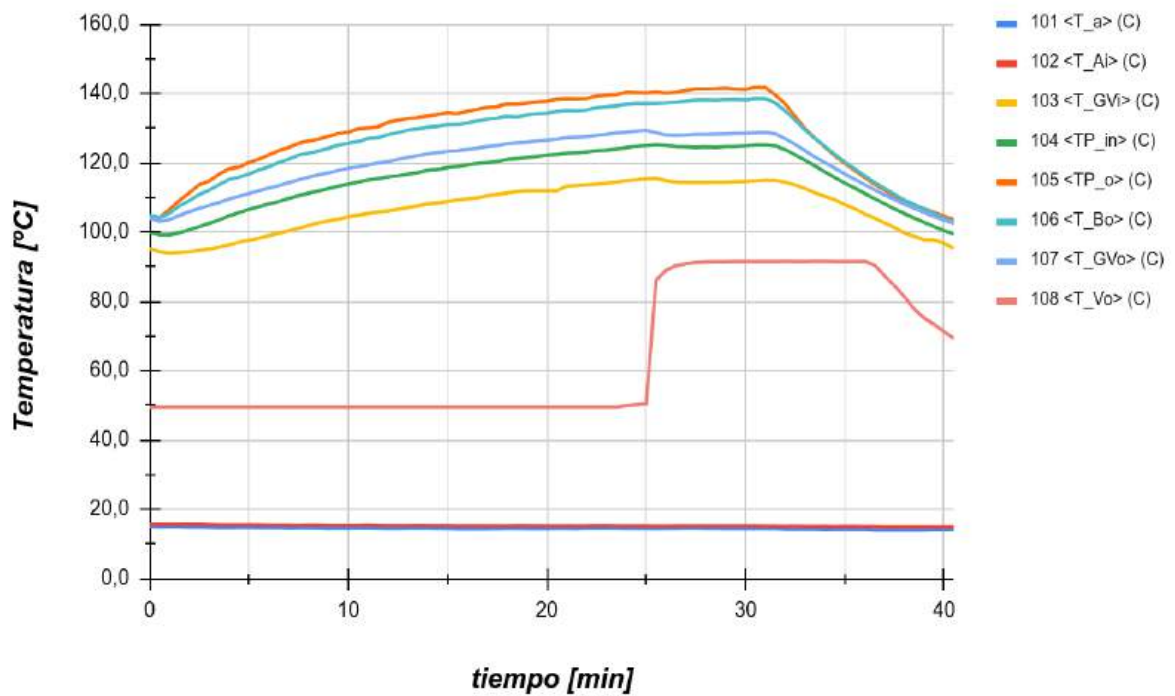


Figura 6. Evolución de la Temperaturas en el circuito térmico sin aislación

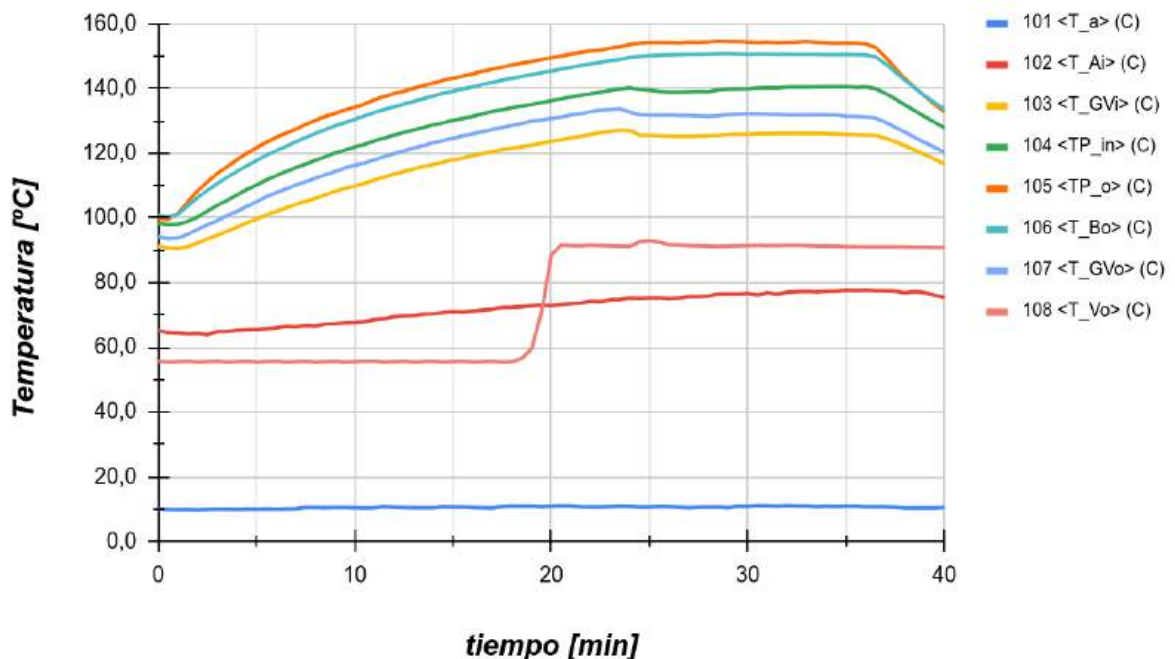


Figura 7. Evolución de la Temperaturas en el circuito térmico con aislación

En la Tabla 2, se muestran los porcentajes del total de energía intercambiada de cada elemento del circuito térmico. Para determinar la energía intercambiada en cada parte del circuito se utilizaron las Ec. (1), (2) y (3). Considerando que el caudal en el mismo en cualquier parte del circuito térmico se pudo

establecer qué porcentaje de energía es intercambiada en cada elemento, para ello se utilizaron las temperaturas medidas en régimen estable antes y después de cada elemento considerado. El elemento que recibe energía es el tanque pulmón (TP) con las resistencias halógenas adosadas. La bomba (B), y el circuito hidráulico pierden energía al medio ambiente durante el funcionamiento mientras que en el generador de vapor (GV) la energía es entregada para la generación de vapor.

$$E_{PB} = \frac{|\dot{m}_{th}C_{p,th}(B_{-o} - TP_{-o})|}{\dot{m}_{th}C_{p,th}(TP_{-o} - T_{GV_i})} \cdot 100 \quad (1)$$

$$E_{GV} = \frac{|\dot{m}_{th}C_{p,th}(T_{GV_o} - B_{-o})|}{\dot{m}_{th}C_{p,th}(TP_{-o} - T_{GV_i})} \cdot 100 \quad (2)$$

$$E_{CHE} = \frac{|\dot{m}_{th}C_{p,th}(T_{GV_o} - T_{GV_i})|}{\dot{m}_{th}C_{p,th}(TP_{-o} - T_{GV_i})} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde \dot{m}_{th} = Flujo másico del fluido térmico [kg/s] y $C_{p,th}$ = Calor específico del fluido térmico [J/kg.K].

Tabla 2: Resumen del porcentaje de energía intercambiada por cada elemento del circuito térmico.

Elemento del circuito térmico	Sin aislación	Con Aislación
Bomba (E_{PB})	18,6%	13%
Generador de vapor (E_{GV})	31%	65,5%
Circuito hidráulico exterior (E_{PCHE})	50,4%	21,5%
Vapor generado	0,36 kg/h	1 kg/h

En la Tabla 2 se puede observar que la aislación térmica A permite duplicar la energía entregada al generador de vapor (GV) con respecto al sistema sin aislación ya que disminuye la energía perdida por la bomba B y por el circuito hidráulico. esto permite tener más energía disponible para la producción de vapor respecto al circuito térmico sin aislación.

El cálculo de la eficiencia térmica global del circuito térmico en estado estacionario se llevó a cabo mediante la Ec. 4, que representa la relación entre la potencia de entrada (700W), proporcionada a través de las resistencias eléctricas, y la tasa de disipación de energía por unidad de tiempo del vapor generado, que equivale a la energía térmica contenida en el vapor generado (1,3 kg/h). Considerando las propiedades termofísicas del agua se obtuvo que el aprovechamiento de la energía eléctrica provista fue de un 60%.

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \lambda}{P_{RC}} \cdot 100 \quad (4)$$

CONCLUSIONES

En este trabajo se logró desarrollar un circuito térmico que permite la circulación de un fluido a alta temperatura por medio de equipos y accesorios disponibles en el mercado local y resistentes a las condiciones de trabajo. Sin embargo, es importante considerar que el fluido térmico utilizado presenta una capacidad de absorber energía por unidad de superficie aproximadamente 3 veces menor comparado con el agua. Esto es una limitante para la utilización de resistencias calefactoras utilizadas en ACS.

Asimismo, en los ensayos de calentamiento de la propuesta inicial de circuito térmico se notó que el material aislante con el que estaban construidas las resistencias no soporta la temperatura de trabajo de este equipo. Del mismo modo, los sellos de grilón utilizados para sujetar las resistencias no lograron mantener la estanqueidad del TP durante las sucesivas pruebas.

Es importante revisar la hoja de seguridad del fluido Paratherm NF ya que es un fluido con baja presión de vapor y que provoca lesiones si se inhala periódicamente. Es por eso que debe considerarse su estanqueidad y la seguridad durante la manipulación en una instalación que lo utilice. También debe considerarse la expansión volumétrica del fluido debido al aumento de temperatura, en donde en este sistema fue de alrededor de 10% del volumen del fluido.

Los ensayos experimentales mostraron que es posible la generación de vapor de agua de baja entalpía alcanzando, en estado estacionario, valores de temperatura en el fluido térmico del orden de 150°C, suficientes para lograr la ebullición del agua en el generador de vapor. Se obtuvo que el aprovechamiento de la energía provista al generador de vapor con aislación es del 60 %, con lo que el efecto del aislamiento térmico mejora sustancialmente el desempeño del sistema. Se propone como trabajo a futuro evaluar el desempeño del generador de vapor conectado al CCP.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto que financió el proyecto a través de la convocatoria “Programas y Proyectos de Investigación”. Período 2020 - 2023 y al proyecto PICT SSPR 2021.

REFERENCIAS

- Akbarzadeh S., Valipour M. (2018). Heat Transfer Enhancement in Parabolic Trough Collectors: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 92 198-218
- Barba F., Gavahian M., Es I., Zhu Z., Chemat F., Lorenzo J. Khaneghah A. (2019). Solar radiation as a prospective energy source for green and economic processes in the food industry: From waste biomass valorization to dehydration, cooking, and baking. *Journal of Cleaner Production* 220 1121-1130
- Chromalox [en línea] Technical Information - Watt Density & Heater Selection - Guidelines. Dirección URL:< [Chromalox Watt Density and Heater Selection](#)> [consulta: 19 de mayo de 2023].
- Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.(2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* 7th ed., John Wiley & Sons,
- Daghero J., Garnica J., Barros J., Rodriguez R. (2013). Concentrador Cilíndrico-Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor para la Extracción de Aceites Esenciales de Plantas Aromáticas y Medicinales. *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 1. pp 02.37-02.44.
- Daghero J., Garnica J., Buitrago A., Dubini D., Lorenzo C., Manero C., Marticorena M., Martinez M., Sayago U. (2015) Concentrador Cilíndrico Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor de Uso Industrial. Evaluación Óptica y Térmica de un Prototipo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 19, pp.03.45-03.54. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES 2015
- Dri F., Busso A., Gea M. (2009). Ensayos de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico con Fluido Caloportador. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 13 03.157-163
- Garnica, J., Daghero, J., Longoni, D., Ortiz, M. (2018). Circuito térmico para la generación de vapor de uso industrial utilizando un concentrador cilíndrico parabólico. Diseño, desarrollo y evaluación térmica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 22, pp 02.13-02.23 Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES 2018
- Ktistis, P. K, Agathokleous, R.A., Kalogirou, S. A.,(2021). Experimental performance of a parabolic trough collector system for an industrial process heat application, *Energy*, Volume 215, Part A, 119288, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119288>.
- Ortiz M. , Stoll R., Daghero J. Podversic, E. y Cortes S. (2022) Desarrollo de un Mecanismo para el Seguimiento Solar Utilizando una Impresora 3D. *Acta de la XLIV Reunión de Trabajo de la*

Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Vol. 9, pp 156-166 2022 ISBN 978-987-29873-1-2

Paratherm [en línea] Fluido de Transferencia Térmica.

Dirección URL <<https://grupoararat.com/pdf/Paratherm/Paratherm-nf-spanish-72.pdf>> [consulta: 29 de Setiembre de 2023]

Solarthermalworld [en línea]: Concentrating solar heat capacity quadruples in 2022. Dirección URL:<<https://solarthermalworld.org/news/concentrating-solar-heat-capacity-quadruples-in-2022/>> [consulta: 14 de agosto de 2023]

Stoll R., Garnica J., Daghero J. (2019) Evaluación térmica de un concentrador solar usado para la generación de vapor de uso industrial. 7° Congreso de Ciencias Ambientales. COPIME 2019. Buenos Aires, 11 de Octubre de 2019 [7° Congreso de Ciencias Ambientales COPIME 2019 - FAPyD \(unr.edu.ar\)](https://www.unr.edu.ar) [consulta: 14 de agosto de 2023]

PERFORMANCE EVALUATION OF A THERMAL LOOP USED IN STEAM GENERATION FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS WITH SOLAR ENERGY

ABSTRACT

In this work the performance of a thermal loop for steam generation of low enthalpy for industrial process heat is presented. This thermal loop is part of a prototype of a parabolic trough collector system. The original thermal loop was modified to improve its energy efficiency and ensure, with the incorporation of halogen resistors, a constant temperature in the thermal fluid. Experimental tests were carried out without connecting the circuit to the solar collector in order to evaluate the energy losses in each of its components. With the insulated system, the thermal fluid reached 150°C at the entrance of the steam generator. The steam flow rate in steady state condition was 1.3 kg/h, and the overall thermal efficiency was 60%. In this way, a substantial improvement was achieved in the use of energy compared to the original thermal loop.

Keywords: solar energy, parabolic trough collector, thermal loop, steam production

CONSTRUCCIÓN Y ANALISIS TÉRMICO DE UN INVERNADERO EN LA ESCUELA ALBERGUE DE CERRO NEGRO DEL TIRAO

José E. Quiñonez¹, Valentín Becchio², Rodolfo A. Di Fonzo², Hugo G. Ortiz², Alejandro L. Hernández^{1,2}

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489 e-mail: jeq1@hotmail.com

RESUMEN: En el presente trabajo se detallan algunos aspectos constructivos de un invernadero andino para la escuela albergue N° 4587. La construcción del invernadero tiene la finalidad de proveer hortalizas todo el año a los niños y personas que se hospedan en el establecimiento. La escuela se ubica en una zona de difícil acceso a 3580 m sobre el nivel del mar y la hostilidad del clima no permite producir variedad de verduras. Se instaló un sistema automático de medición para registrar datos de temperatura en el interior del invernadero. Se realizó un estudio termo energético mediante mediciones de temperaturas, comparando los datos y valorando las transferencias de calor. Luego, se ingresaron los datos constructivos y propiedades térmicas en un software de simulación de edificios, obteniendo buenos ajustes entre datos simulados y medidos. Por último, se extrapoló para el mes con menor temperatura exterior con el fin de predecir su comportamiento y proponer mejoras.

Palabras clave: invernadero andino, energía solar, solar térmica.

INTRODUCCIÓN

El paraje Cerro Negro del Tirao, departamento Rosario de Lerma, provincia de Salta, se encuentra al pie del gran cerro Malcante, es colindante al Parque Nacional Los Cardones, al oeste del primer cordón montañoso de la cordillera oriental, oscilando su relieve a través de quebradas, planicies y conos aluviales. Presenta una altura de entre 3000 a 3700 metros y se caracteriza por la presencia de un clima árido a semi-árido. La amplitud térmica es muy marcada (máxima 20 °C, mínima -10 °C) y en los meses de agosto y setiembre se pueden registrar grandes ráfagas de viento que llegan hasta los 70 km/h (Di Fonzo, Becchio y Belmonte, 2022). Se accede al paraje a través de la Ruta provincial N°33, de pavimento y transitable todo el año, en dirección a Payogasta y Cachi. En la parte Norte de la recta del Tin Tin, se toma un desvío en dirección Este por la Ruta provincial secundaria N°48. Por este camino rural, se debe recorrer aproximadamente 50 km por ripio y cornisas. El camino se interrumpe en verano producto de las crecidas de pequeños cauces y arroyos de quebradas imposibilitando así el acceso de vehículos desde fines de diciembre a fines de febrero. Este camino termina en la Escuela Albergue N°4587. Actualmente, la escuela cuenta con una matrícula de 12 estudiantes, además de contar con la presencia de dos docentes y un ordenanza de manera permanente, y docentes itinerantes que se alojan en la escuela por distintos periodos de tiempo. En la escuela estudian, trabajan, comen y duermen entre 16 y 22 personas de lunes a viernes.

En Cerro Negro del Tirao habitan 14 familias campesinas de manera dispersa a lo largo del territorio, algunas de las casas se ubican al borde del camino, mientras que las que se encuentran pasando la escuela no cuentan con camino vehicular para acceder a sus hogares, teniendo que movilizarse hasta 3 horas por caminos de herradura para llegar desde el camino de vehículos hasta sus hogares. Las familias también se movilizan hacia los pueblos y ciudades del valle de Lerma a través de caminos de herradura que atraviesan los valles de El manzano y Corralito, para llegar así a la ciudad de Rosario de Lerma luego de unas 8 horas de viaje a caballo (Di Fonzo, Becchio y Belmonte, 2022, 2023). Las condiciones climáticas del lugar limitan la producción agrícola a unas pocas especies de hortalizas (papa andina,

habas, arvejas, hortalizas de hoja a escala familiar) casi exclusivamente a los meses de verano. Por otro lado, las dificultades en el acceso al paraje condicionan la posibilidad de acceso a frutas y verduras frescas desde los centros urbanos. Es así que la dieta de las familias de Cerro Negro del Tirao en general, los niños y trabajadores que habitan en la escuela, se ve limitada al consumo de lo que se produce in situ y algunas hortalizas que se puede traer desde la ciudad aprovechando viajes que realizan los maestros una vez por semana para ir a la escuela.

A comienzos del año 2022 en el marco de dos proyectos surge la posibilidad de implementar, por un lado, tecnologías vinculadas a las energías renovables y por otro lado continuar con la mejora de los sistemas productivos en la comunidad. Mediante el financiamiento de estos proyectos, se discutió sobre las posibles acciones a desarrollar en una reunión comunitaria con los habitantes de Cerro Negro del Tirao a principios del año 2022. Habiendo conversado sobre distintos desarrollos tecnológicos con potencial de implementación, la comunidad fue la que decidió sobre la construcción de un invernadero en el predio de la escuela, con el objetivo principal de producir hortalizas para abastecer el comedor escolar, diversificando así la dieta de los niños que asisten. Además, surgió la posibilidad de que esta aplicación térmica sea replicada en las casas de las familias por lo que resultaba interesante la construcción del invernadero en la escuela para dar a conocer esta tecnología al conjunto de las familias del paraje.

La construcción del invernadero en Cerro Negro del Tirao se basó en investigaciones y desarrollos de invernaderos en altura (Abdo et. al, 2005; Echazú et. al, 2004; Quiroga et. al, 2008), entre otros. El invernadero tipo andino boliviano se caracteriza por estar construido con paredes de adobe, sin estructura de hormigón armado, con techo a un agua, incorpora otro espacio físico llamado “cámara oscura” en el sector sur, la cual intercambia aire con la zona de cultivo. Esta adaptación busca reducir los efectos de la amplitud térmica característica de la región andina reduciendo la temperatura en horas de mayor radiación. En palabras de los autores “El modelo andino boliviano se adaptó mejor a las condiciones climáticamente más drásticas de la puna y pre-puna argentinas, regulando mejor la temperatura”. En Echazú y Quiroga (2016) se describe como se llega a los diseños de invernaderos andinos a partir de una serie de mejoras hechas sobre el modelo andino boliviano, incorpora una cubierta de forma elíptica en la cámara de cultivo, una estructura de hormigón armado y la mejora en los sistemas de circulación de aire, conformándose, así como un nuevo modelo: el invernadero tipo El Rosal. Este invernadero fue construido en el año 2005 y se encuentra todavía en funcionamiento, cuenta con una buena sistematización de los procesos constructivos (Echazú et. al, 2004) y fue evaluado térmicamente en (Quiroga et. al, 2016). El modelo tipo El Rosal ha demostrado su adaptabilidad a este tipo de clima a lo largo de los años, produciendo hortalizas para abastecer el comedor de la escuela. En el presente trabajo se adopta el modelo tipo El Rosal debido a sus prestaciones constructivas y similitudes climáticas. Se detallan aspectos constructivos del invernadero en la escuela de Cerro Negro del Tirao. Además, se realizan mediciones de temperaturas, evaluación termoenergética y simulaciones con el objetivo de proponer mejoras a futuro.

DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO

Emplazamiento

La elección se basó en premisas básicas como: orientación, nivelación de terreno y toma de agua. La zona donde está ubicada la escuela es un terreno irregular con muchas pendientes. En la Figura 1 (a) se recuadra en amarillo el lugar donde se construyó el invernadero y se indica el sentido de pendiente decreciente, flecha azul. La orientación del invernadero esta desviada hacia el este respecto del norte geográfico, la toma de agua de la escuela se ubica en zona oeste de la escuela. La Figura 1 (b) muestra una fotografía durante el proceso de nivelación del terreno. El movimiento de tierra se realizó de manera manual. Al ser un terreno con pendiente bien pronunciada, ayudó a que la cara oeste del invernadero quede resguardada evitando el fuerte impacto de los vientos.



Figura 1: (a) Ubicación del invernadero, (b) excavación y nivelación de terreno.

Los planos y estructura de la obra

En la Figura 2 se tienen algunos detalles del invernadero andino, en (a) se muestra un plano de vista en planta y perfil, y en (b) un esquema en 3D. La zona de cultivo, se ubica en el sector norte para recibir la mayor cantidad posible de luz, tiene una cubierta transparente de plástico de invernadero y su forma es elíptica para soportar los fuertes vientos. La cámara oscura está ubicada en el sector sur y tiene de cubierta un techo de chapa. Las ventanillas frontales a la altura del suelo tienen como finalidad la renovación de aire en el interior del invernadero para controlar el sobre calentamiento. La pared interior entre la zona de cultivo y cámara oscura, también tiene ventanillas en la parte inferior y superior para favorecer el intercambio de aire entre los dos ambientes. Durante el proceso de obra se replantearon detalles de aberturas y dimensiones. Las medidas definitivas del invernadero son 10 m de ancho y 7 m de profundidad.

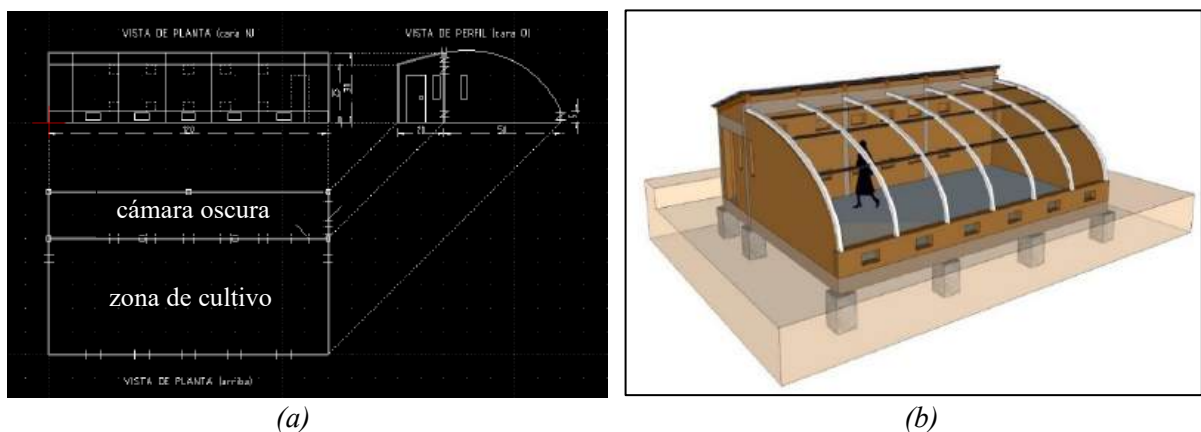


Figura 2: Invernadero, (a) vista de planta y de perfil, (b) esquema en 3D.

Ejecución de obra

Durante la ejecución de obra se realizaron visitas y jornadas de trabajo todos los meses desde abril a diciembre con permanencia de 2 a 4 días. Los ladrillos de adobe fueron elaborados por personas de la comunidad en el predio de la escuela. Se fabricaron aproximadamente 1200 ladrillos de 12x17x40 cm, no son de la medida usualmente usada en las construcciones de la zona, pero por disponibilidad de adoberas se optó por estas medidas. Durante el mes de junio hasta agosto se realizó el cavado para zapatas, vigas de arriostra y su posterior llenado. Luego se levantaron las paredes de adobe y se llenaron las columnas de soporte de las mismas y las vigas de cierre. En el mes de septiembre se colocó el techo de la cámara oscura, en este caso es de chapas acanaladas con aislamiento térmico de 2 cm de espesor de espuma de polietileno. Posteriormente se plantaron los arcos de soporte para la cubierta plástica de la zona de cultivo.

A fines del mes de septiembre, se colocó la cubierta plástica en la cámara de cultivo. La colocación no es una tarea fácil de resolver, ya que debe quedar bien fija y superficialmente bien estirada. Durante el proceso de construcción se replantearon cantidad de aberturas y dimensiones, quedando finalmente cuatro aberturas frontales para control de temperatura en la zona de cultivo y la misma cantidad de

aberturas en la pared divisoria entre ambos ambientes. Al principio el invernadero funcionó con agua arrimada de otros servicios dentro de la escuela. Luego, desde febrero del presente año, se instaló un sistema de abastecimiento de agua exclusivamente para el invernadero.



Figura 3: Proceso de construcción del invernadero en la Esc. Albergue N°4587.

En la Tabla 1 se detalla los insumos y materiales utilizados para la construcción del invernadero. Cabe destacar que al ser una zona de difícil acceso y alejada de los grandes centros comerciales, la logística de transporte es importante para poder llevar adelante este proyecto.

Tabla 1: Insumos y materiales para la construcción del invernadero.

Insumos y materiales	Cantidad	Destino
Adoberas 12 cm x 17 cm x 40 cm	2	Paredes
Hierro torsionado 10 mm x 12 m	40	Columnas, vigas y zapatas
Hierro torsionado 6 mm x 12 m	45	Columnas, vigas y zapatas
Alambre N°16 (1,59 mm)	10 kg	Columnas, vigas y varios
Alambre N°14 (2,03 mm)	10 kg	Columnas, vigas y varios
Chapas acanaladas calibre 25 x 2,5 m	13	Techo cámara oscura
Aislante térmico doble capa 10 mm x 10 m	1	Techo cámara oscura
Tornillos autoperforantes 2"	150	Techo cámara oscura
Clavos punta paris 2" y 2,5"	4 kg	Usos varios
Caño rectangular 10 mm x 30 mm x 1,2 mm x 6 m	4	Usos varios
Hierro ángulo 3/4" x 1/8" x 6 m	1	Usos varios
Planchuela 3/4" x 1/8" x 6 m	1	Usos varios
Cemento x 50 kg	30	Columnas, vigas y zapatas
Postes eucalipto 15 mm x 2,5 m	2	Techo cámara oscura
Pintura asfáltica x 4 L	1	Aislación de base en paredes
Madera para encofrar 0,02 m x 2 m	10	Columnas y vigas
Perfil C 80 mm x 50 mm x 2 mm x 12 m	3	Techo cámara oscura
Angulo 1 1/2" x 1/8" x 6 m	5	Aberturas
Angulo 1 1/4" x 1/8" x 6 m	4	Aberturas
Bisagras ala corta	12	Aberturas
Alambre negro N° 8 (4 mm)	10 kg	Techo cámara y varios
Pintura esmalte 3 en 1 x 4 L	1	Arcos
Polietileno ADT 150 micrones 7,2 m x 6,5 m	1	Techo cámara de cultivo
Arcos caño estructural redondo 1,5" x 2 mm x 5 m	8	Techo cámara de cultivo
Madera 3/4"	5 m ²	Aberturas
Herramientas varias de trabajo	-	-

Una vez terminada la construcción del invernadero, la organización productiva realizada por las personas responsables y niños de la escuela fue fluida. Desde su funcionamiento el invernadero está produciendo hortalizas. La participación activa de la comunidad y la escuela hicieron que la tecnología sea aceptada y apropiada por ellos. El entusiasmo y la productividad se ven reflejados en las fotografías de la Figura 4, las mismas fueron enviadas por la directora de la escuela.



Figura 4: Producción en el invernadero (lechuga morada y cremosa, acelga, cebollines, perejil, arvejas y tomate).

MEDICIÓN DEL INVERNADERO

La finalidad de estudiar termo energéticamente al invernadero es poder predecir su comportamiento frente a situaciones extremas de clima. Lo más fácil de controlar son las elevadas temperaturas ya que simplemente se debe abrir ventanillas para renovar el aire en su interior. En cambio, las bajas temperaturas pueden ocasionar la muerte de las plantas. Entonces es conveniente plantear estrategias o proponer mejoras. Es importante conocer su impacto y optimizar los recursos. A continuación, se presenta todo lo relacionado con las mediciones y estimaciones realizadas.

Descripción del datalogger

Las mediciones fueron realizadas mediante un datalogger autónomo que utiliza un microprocesador ATmega328. El microprocesador fue acondicionado electrónicamente para la realización de estas medidas tratando optimizar sus recursos. El sistema de adquisición de datos es alámbrico, y cuenta con diez sensores de temperatura. Las longitudes de cable en cada sensor son mayores a 3 m, por ello, se optó realizar las mediciones de temperaturas con sensores digitales DS18B20. Estos tipos de sensores permiten asignarle una dirección y es posible conectar varios de ellos en un mismo canal. Para evitar la incidencia directa de la radiación, todos los sensores fueron acondicionados mediante una pantalla reflectante. Los registros fueron realizados cada cinco minutos y almacenados en una tarjeta de memoria.

Ubicación de Sensores

Al momento de instalar los sensores, el invernadero estaba produciendo hortalizas. Por lo tanto, tenían parcelas con diferentes cultivos y sendas de paso. La distribución y ubicación de sensores se realizó de

manera que no entorpezcan el paso y además resulten representativas para el estudio térmico. El invernadero tiene dos ambientes, una zona de cultivo y una cámara de aire (cámara oscura). Ambos ambientes están separados mediante una pared masiva de adobe de 18 cm de espesor.

En la Figura 5 (a-c) se representa al invernadero y se detalla la ubicación de los sensores mediante puntos denominados con la letra S. En el esquema (a), se observa la vista norte, zona de cultivo, en (b) una vista suroeste y (c) vista este, cámara de aire. Con la finalidad de mostrar con mayor claridad la ubicación de los sensores no se representa la cubierta transparente de la zona de cultivo y se realiza un corte en la pared este, cámara de aire.

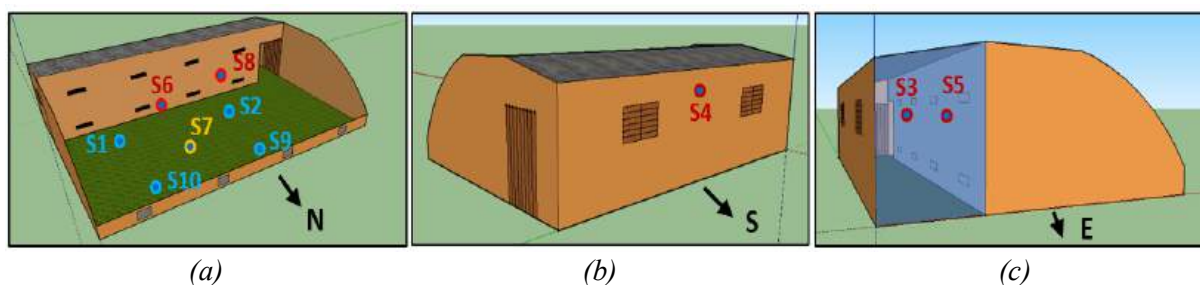


Figura 5: Ubicación de sensores en el invernadero, (a) vista norte, (b) vista sur y (c) vista este.

Todos los sensores se conectan al datalogger ubicado en la cámara de aire. Los sensores S1, S2, S9 y S10 registran datos de temperatura a nivel del cultivo, 20 cm de suelo. S9 y S10 están ubicados cerca de las ventanillas frontales del invernadero, S1 y S2 están ubicados en la misma dirección por detrás de los anteriores, respectivamente. El sensor S7, está enterrado a 7 cm de la superficie y ubicado en el centro geométrico de la zona de cultivo, aproximadamente. Los sensores S6 y S8 representan la temperatura del aire a la altura de la cabeza, 1,70 m, en la zona de cultivo, y S3, S5 se encuentran en la cámara de aire a 1,80 m del suelo. Por último, S4 mide la temperatura del ambiente exterior.

La Figura 6 (a-c) muestra el cableado de algunos sensores instalados en el interior del invernadero. En (a) el sensor está ubicado cerca de la parcela de lechugas, en (b) suelo preparado para realizar trasplante de alguna hortaliza, sensor ubicado a media altura y en (c) un sensor a nivel de cultivo de cebollas y otro a una altura de 1,70 m. En todas las imágenes se observan cables colgantes con un objeto plateado que recubre al sensor. El recubrimiento es una fina lamina de aluminio para apantallar la radiación solar directa.



Figura 6: Sensores instalados en el interior del invernadero, (a) nivel de cultivo, (b) nivel medio y (c) nivel de cultivo y 1,7m de altura.

Resultados de las mediciones

Los datos de temperatura que se presentan corresponden a condiciones normales de funcionamiento, ya que, el invernadero estaba en pleno funcionamiento al momento de la medición. En todas las gráficas se incluye los datos de temperatura del ambiente exterior, T_{amb} . El día completo de medición corresponde al diecisiete del mes de marzo. Los lugareños comentan que durante esta época del año es común que por las tardes “bajen las nubes”, es decir, se nuble.

La Figura 7 presenta los datos medidos a nivel del cultivo, S1, S2, S9 y S10, 20 cm de suelo. Los cuatro puntos de medición muestran gran amplitud térmica durante el día. Las temperaturas interiores y del ambiente exterior tienen la misma tendencia durante el día-noche. A partir de la salida del sol, 7:30 aproximadamente, las temperaturas en el interior del invernadero tienen un mayor incremento y alcanzan valores superiores a 25°C. Luego, considerando las horas donde no hay incidencia de radiación solar, 18:00 aproximadamente, las cuatro temperaturas se uniformizan y van en descenso debido a las pérdidas térmicas hacia el exterior. En este caso, se mantiene una diferencia de 5°C entre las temperaturas y el ambiente exterior durante varias horas nocturnas. El tipo de descenso muestra que existe un poco de acumulación de energía en el interior del invernadero. El mínimo alcanzado en el interior es de 7°C, mientras el ambiente exterior estuvo a 5°C. Considerando 3°C de temperatura mínima para que las hortalizas no tengan estrés térmico, se observa que las plantas no se ven afectadas para esta fecha.

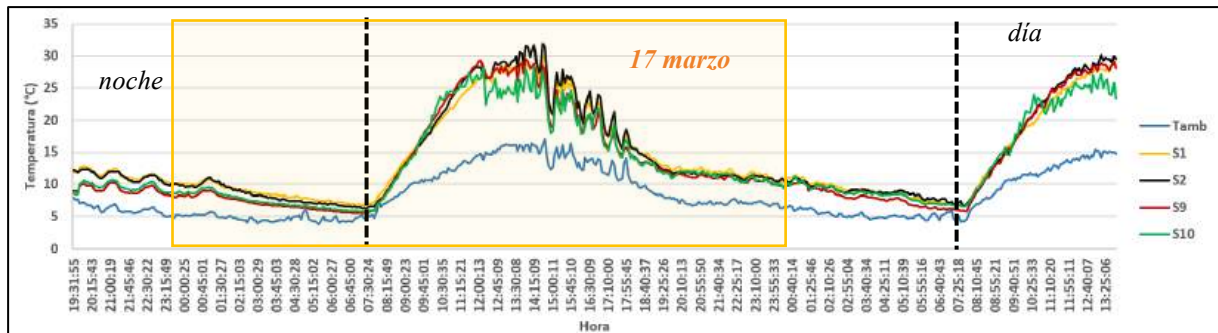


Figura 7: Temperatura del aire a nivel del cultivo.

En la Figura 8 se grafica la temperatura ambiente en el interior del invernadero a la altura de la cabeza, 1,70 m. Comparando estos datos con los del nivel de cultivo, se tiene diferencias entre 2 °C y 3 °C por arriba en horas diurnas. Mientras que en horas nocturnas se asemejan hasta terminar prácticamente iguales al llegar a la mínima de 7 °C. Esta igualdad de temperaturas de dos sensores ubicados a diferentes alturas muestra que no hay estratificación y el aire está convectando durante la noche. Teniendo en cuenta el rango de 18-25 °C como un valor óptimo de crecimiento y desarrollo para las plantas en horas diurnas, se observa que hay un excedente de energía durante las 10:30 y 16:30 horas que podría ser energía acumulada para mejorar la situación térmica nocturna.

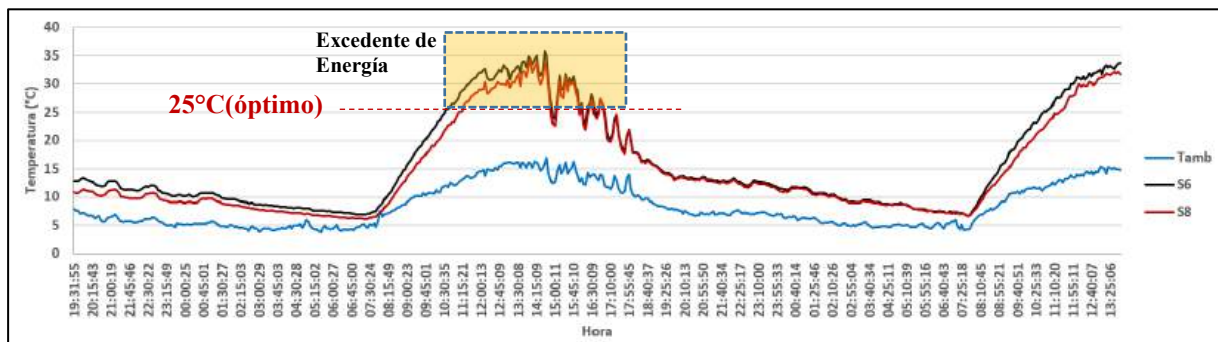


Figura 8: Temperatura ambiente en el invernadero.

La Figura 9 muestra la temperatura de dos sensores ubicados en la cámara de aire. Este sector no recibe radiación directa, su techo es de chapa aislada térmicamente con membrana aislante de espuma de 20 mm de espesor. Con respecto a los datos medidos, se observa nuevamente un incremento de la temperatura del aire durante las horas diurnas y un descenso en las noches. Existe una diferencia con el exterior, aunque menor que en los otros casos. Recordemos que, la zona de cultivo y cámara de aire están separadas por una pared masiva que tiene ventanillas y una abertura de paso. Evidentemente, durante el día la zona térmica del cultivo aporta energía hacia la cámara de aire a través de las aberturas (se explica más adelante).

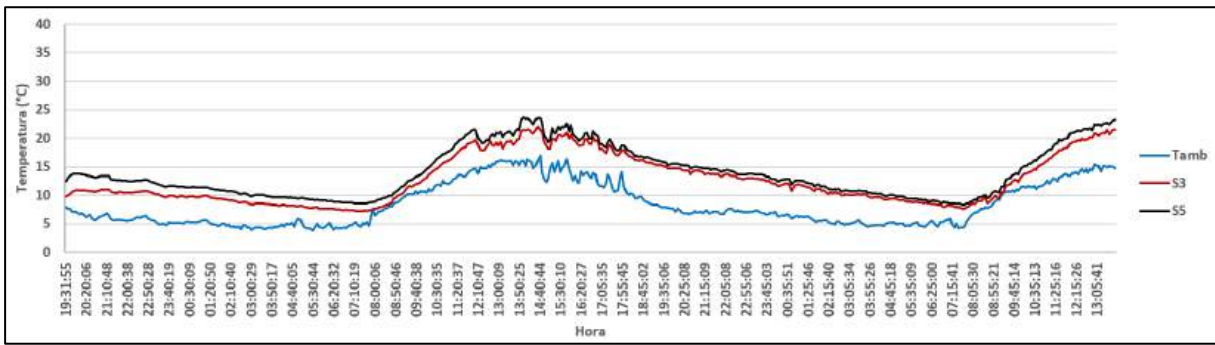


Figura 9: Temperatura ambiente en la cámara de aire.

La Figura 10, muestra la variación de temperatura del sensor que se encuentra enterrado en el suelo del cultivo. La temperatura oscila entre 13 °C y 17 °C durante un día completo. El valor mínimo se obtiene a las 9 am y el valor máximo a las 17 pm. Este dato permite aproximarse a la temperatura en las raíces del cultivo. Durante este día de medición el suelo se encontraba con bastante humedad debido al riego, esto ayudo a que no tenga grandes variaciones durante el día.

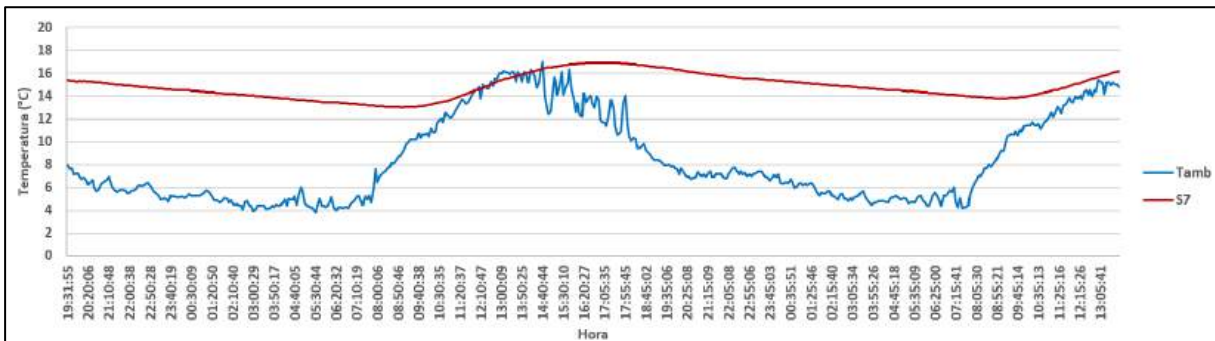


Figura 10: Temperatura de suelo en la zona de cultivo.

A modo comparativo se grafica la Figura 11, donde se representa las temperaturas ambientes en la zona de cultivo, S2 y S8, y la temperatura ambiente en la cámara de aire, S5. Durante las horas de sol es mayor la temperatura en la zona de cultivo que en la cámara de aire. Mientras que, sucede lo inverso durante las horas nocturnas, donde es mayor la temperatura en la cámara de aire. Esto indica que hay un movimiento de fluido durante las 24 horas del día entre los dos ambientes. Es notorio el aporte de energía desde la cámara de aire hacia la zona de invernadero (zona remarcada) en las horas nocturnas, la cámara de aire esta entre 2 y 3 °C por encima que en zona de cultivo.

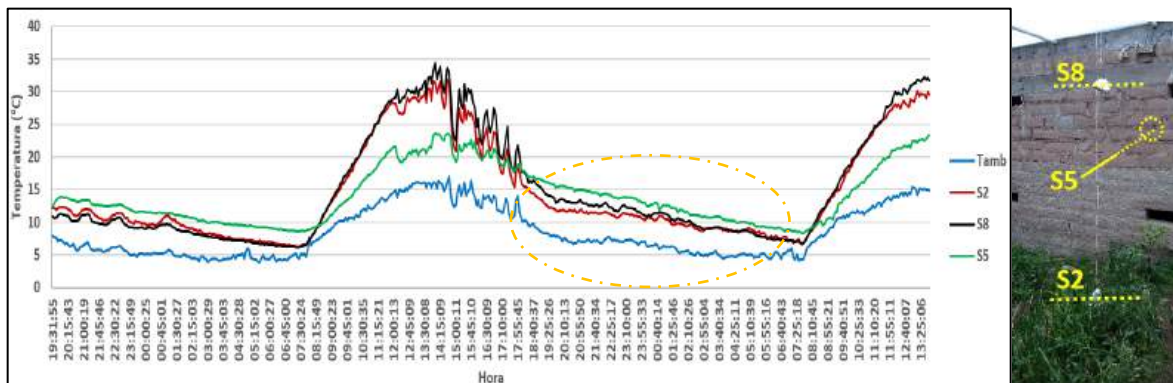


Figura 11: Temperatura ambiente, exterior, zona de cultivo y cámara de aire.

Simulación

Con la finalidad de predecir y proponer mejoras a futuro se realiza una simulación del invernadero mediante el software SIMEDIF 2.0. Este software permite obtener las temperaturas de los ambientes para cualquier época del año. Para ello se consideró a los dos ambientes, sus dimensiones, propiedades

térmicas de los materiales y datos climáticos del lugar. Al ser una zona de altura del noroeste argentino se conoce que existe buena disponibilidad del recurso solar y grandes amplitudes térmicas diarias. En invierno es frecuente que durante las noches se tenga varias horas de temperaturas exterior bajo cero.

Para validar el modelo del invernadero, se contrasto los datos medidos del día 17 de marzo con los simulados por SIMEDIF para ese mismo día. Hay muchas dificultades para encontrar datos climáticos del lugar, ya que no existe una estación meteorológica en el sitio. Por lo tanto, se optó por datos satelitales de la página web de National Solar Radiation Database (NSRDB). El software necesita como datos de entrada la irradiación global diaria sobre el plano horizontal y las temperaturas, máxima, media y mínima. Los valores ingresados fueron los siguientes: $H = 26,6 \text{ MJ/m}^2$, $T_{\text{máx}} = 15,90 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{med}} = 9,09 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{mín}} = 3,8 \text{ }^\circ\text{C}$. De todas formas, se presenta la Figura 12 donde muestra la variación de temperatura ambiente e irradiación solar global diaria sobre el plano horizontal para el 17 de marzo. La estimación de irradiación solar global horaria fue realizada a partir del dato diario usando el software GEOSOL mediante el modelo de cielo claro, (Hernández, 2003).

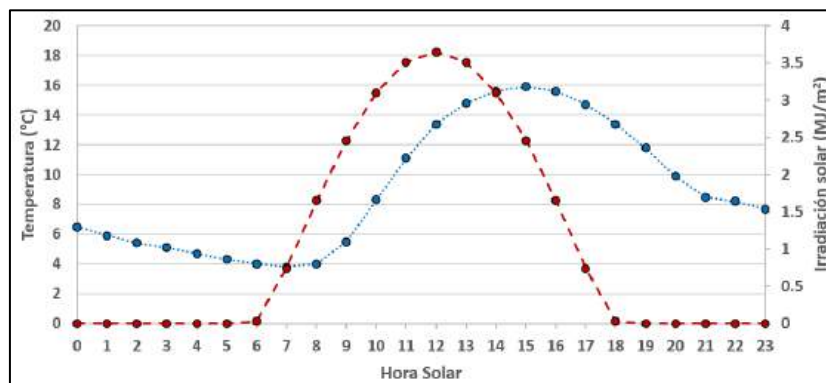


Figura 12: Evolución temporal de la temperatura ambiente y radiación solar sobre plano horizontal, 17 de marzo.

El resultado de la simulación para la zona de cultivo se presenta en la Figura 13. Además, se contrasta con los datos medidos para el 17 de marzo. Al comparar los datos medidos y simulados, desde las 0 hs. del día 17 hasta las 13 hs. del día 18, se observa una buena estimación en la zona de cultivo. Durante las horas de noche la diferencia entre medidos y estimados es inferior o igual a $2 \text{ }^\circ\text{C}$. A partir de la salida de sol se observa que existe muy buena correlación. Luego desde las 13 hs los datos medidos indican la existencia de nubes por este motivo se nota mucha dispersión en la gráfica.

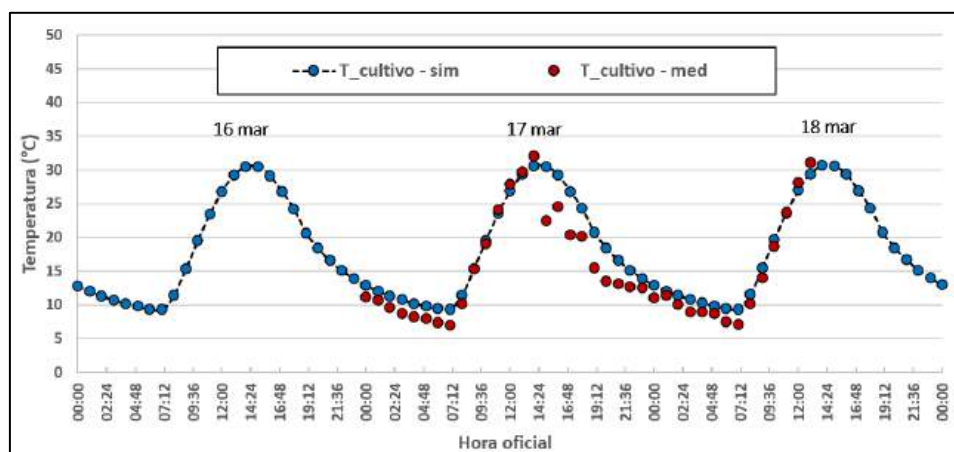


Figura 13: Comparación datos medidos vs simulados en zona de cultivo, 17 de marzo.

Ahora se contrasta temperatura simulada y medida en la cámara de aire, Figura 14. Nuevamente se observa una buena correlación a partir de las 0 hs del 17 de marzo hasta horas cercanas al mediodía, las diferencias de temperaturas entre ambos valores son menores a $2 \text{ }^\circ\text{C}$. La simulación considera un día despejado, cielo limpio, por este motivo la presencia de nubes genera que los datos medidos estén por

debajo de los estimados a partir de las 13 hs. De todas maneras, ambos datos tienen pendiente decreciente similares, esto se observa durante las dos noches.

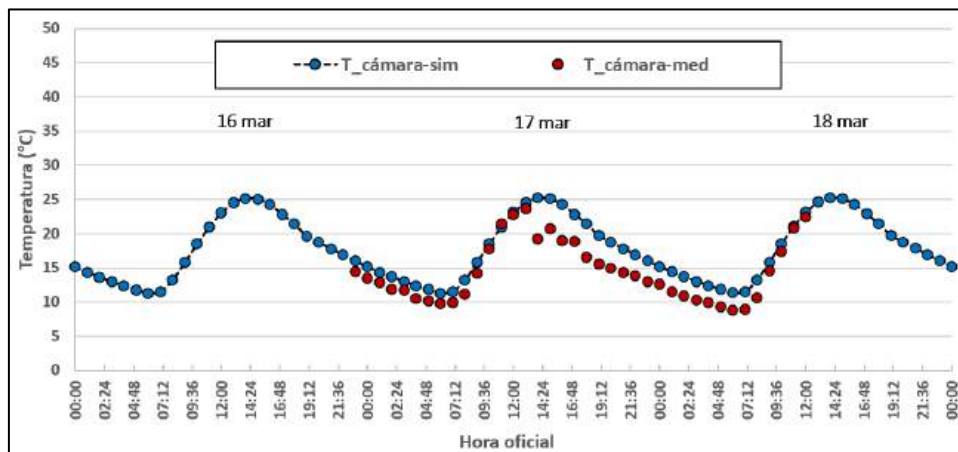


Figura 14: Comparación datos medidos vs simulados en cámara de aire, 17 de marzo.

Como resultado de la comparación entre datos medidos y simulados, se considera que el modelo del invernadero es apropiado para predecir condiciones futuras de comportamiento térmico. Ahora, con la finalidad de conocer su comportamiento frente a climas más severos, se extrapola el modelo para estimar la temperatura en la zona de cultivo y cámara de aire para el mes de julio. Para este caso se consideró: $H = 17,91 \text{ MJ/m}^2$, $T_{\text{máx}} = 5,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{med}} = 2,39 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{mín}} = -8,10 \text{ }^\circ\text{C}$.

El resultado de la estimación se muestra en la Figura 15, donde se presentan 3 días de simulación, 4, 5 y 6 de julio. Los altos niveles de radiación solar no garantizan el funcionamiento del invernadero en el rango de temperatura deseado. La baja temperatura exterior incrementa las pérdidas térmicas, trayendo consecuencias graves en el cultivo. En la zona de cultivo, se tiene varias horas de temperatura bajo cero, desde las 3 hasta las 9 horas, esta condición provocará consecuencias adversas sobre el cultivo. Una información interesante que marca la simulación es el intercambio de energía entre ambos ambientes (zona de cultivo y cámara de aire), lo que nos da un indicio que se pueden mejorar las condiciones térmicas de la cámara de aire. Las condiciones de temperatura utilizadas en la simulación no son las extremas, generalmente en las noches de invierno se alcanza fácilmente $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. Los resultados demuestran que se deben tomar medidas de prevención y mejoras térmicas, con la finalidad de optimizar las condiciones en el interior del invernadero para los meses de invierno.

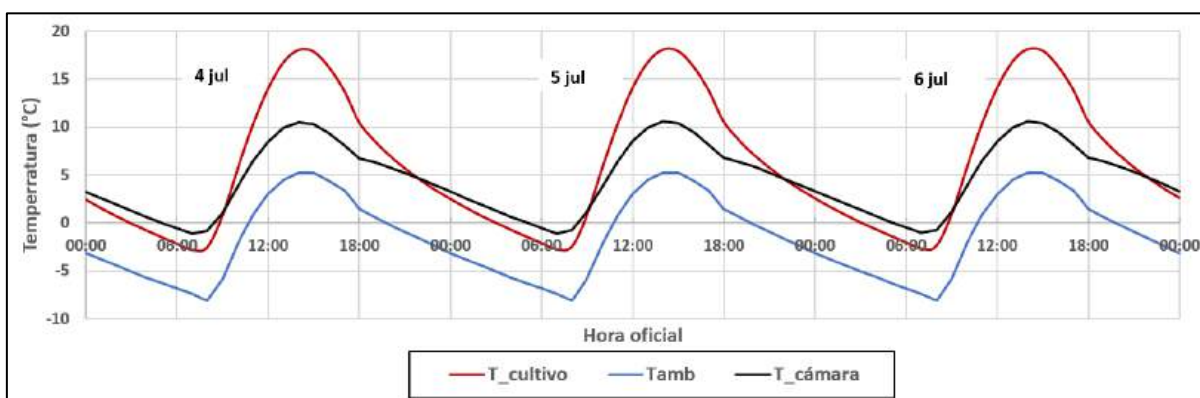


Figura 15: Estimaciones de temperatura en el interior del invernadero para días de julio.

A modo de comentario, la directora de la escuela nos comunicó que las plantas se helaron cuando tuvieron 2 días de mucho frío, antes de llegar al mes de julio. La planta que primero sufrió la helada fue el tomate. Es conveniente tomar medidas pensando en el próximo año.

CONCLUSIONES

La Escuela Albergue N° 4587 es una institución que nuclea a toda la comunidad del Cerro Negro del Tirao. Haber construido un invernadero para la producción de hortalizas muestra el trabajo interdisciplinario entre los investigadores, responsables de la escuela y la comunidad, logrando concretar una propuesta de investigación y acción participativa.

La construcción del invernadero tuvo resultados positivos. Además de variar la dieta alimenticia de los niños, ellos lograron conectarse con la tierra a través de actividades sensoriales beneficiosas para su desarrollo desde lo cognitivo y emocional. También, los maestros realizaron trabajos educativos en torno al invernadero.

Otro logro importante de la escuela a través del ministerio de educación, fue la incorporación de un maestro agrónomo. El maestro los visita una vez a la semana para cuidar de las plantas y educar a los estudiantes.

Se pretende continuar monitoreando las temperaturas del invernadero, para optimizar su funcionamiento. Se debe mejorar la adquisición de datos, el datalogger consume rápidamente las baterías. Además, los datos medidos permiten validar y mejorar el ajuste del modelo en otras épocas del año. Es importante contar con datos medidos en la época invernal para continuar con la validación del modelo. La simulación realizada para días del mes de julio mostraba en el interior del invernadero temperaturas bajo cero, esto ocurrió realmente de acuerdo a la información brindada por la directora.

En base a la información y estudio realizado, se proponen mejoras para las condiciones térmicas en el interior del invernadero. Una de ellas, es oscurecer las paredes del interior del invernadero para mejorar la absorción solar, en particular la pared que tiene una cara expuesta al norte. Otra posibilidad es aumentar la masa térmica en la zona de cultivo, para lograr atenuar la amplitud térmica diaria. También se evaluarán otras propuestas más sofisticadas, pero siempre con la premisa de practicidad en cuanto a la aplicación porque es una zona de difícil acceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a las partes que hacen posible llevar adelante este proyecto. Proyecto PROCODAS-PTIS 2021 “Energías renovables en los cerros de Salta: Construyendo redes de colaboración para el buen vivir”; Proyecto PFI 2021 “Certificación de origen con base agroecológica y economía solidaria: Redes colaborativas de innovación en los cerros de Rosario de Lerma y La Caldera, Salta.”; y la Comunidad de Cerro Negro del Tirao.

REFERENCIAS

- Abdo, E. SZanto, A., Echazú, R., y Quiroga, M. (2005). La difusión de invernaderos de altura con diseño mejorado en Nazareno, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9. 10.07-10.12.
- Di Fonzo, R., Becchio, V., y Belmonte, S. (2022). Formas de habitar en Cerro Negro del Tirao, Salta: Una aproximación desde la investigación acción participativa. Primer Encuentro TERRITORIOS HIDROSOCIALES EN DISPUTA. Modelos de desarrollo, formas de habitar y crisis socioambiental. 25 y 26 de agosto de 2022. Modalidad virtual. Evento organizado por el Instituto de Investigaciones en Humanidades y Ciencias Sociales. Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales. Universidad de la Plata.
- Di Fonzo R., Becchio V., y Belmonte S. (2023). Procesos participativos hacia la Soberanía Alimentaria y el Buen Vivir en Cerro Negro del Tirao, Salta, Argentina. *Perspectivas Rurales, Nueva Época*. Universidad Nacional Costa Rica (En prensa).
- Echazú, R., Quiroga, M., Saravia, L., Astudillo, C., y Palacios, A. R. (2004). Diseño construcción y primeros ensayos de invernadero en El Rosal, provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8, 02.43-02.48.
- Echazú, R. D., y Quiroga, M. A. (2016). *Energía Solar*. Capítulo 6: Invernaderos y Energía Solar, 1° edición especial, pp. 88-111. ANCFN, Buenos Aires.

- Hernández, Alejandro L. (2003). GEOSOL: Una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7, 11.19-11.24.
- INENCO - Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, UNSa-CONICET. Dirección URL: <<https://leb.inenco.unsa.edu.ar/index.php/es/software/simedif-2-0-calculo-termico-de-edificios/>> [consulta: 14 de agosto de 2023]. Versión diseñada por la Dra. Silvana Flores Larsen.
- NREL Transforming Energy [en línea]. NSRDB - National Solar Radiation Database. Dirección URL: <<https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>> [consulta: 14 de agosto de 2023].
- Quiroga, M., Palacios, A., Hoyos, D., y Echazú, R. (2016). Estudio experimental de dos invernaderos andinos en El Rosal, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20, 02.21-02.29.
- Quiroga, M. A., Anquín, A. D., y Hoyos, D. (2008). Una experiencia interdisciplinaria de educación, extensión y transferencia en El Alisal-Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 10.25-10.31.

CONSTRUCTION AND THERMAL ANALYSIS OF A GREENHOUSE IN THE ‘ESCUELA-ALBERGUE’ OF CERRO NEGRO DEL TIRAO

ABSTRACT In the present work some constructive aspects of an Andean Greenhouse for the escuela-albergue N° 4587, are detailed. The construction of the greenhouse has the purpose of providing vegetables all year round to the children and people who stay at the establishment. The school is located in an area of difficult access at 3580 above sea level and the hostility of the climate does not allow the production of a variety of vegetables. An automatic measurement system to record temperature data inside the greenhouse, was installed. A thermo-energetic study was carried out by means of temperature measurements, comparing the data and evaluating the heat transfers. Finally, the construction data and thermal properties into a building simulation software, were entered. The model with the measured data, was validated. Then, it was extrapolated for the month with the lowest outside temperature in order to predict its behavior and propose improvements.

Keywords: andean greenhouse, solar energy, solar thermal.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO DE BAJA ENTALPÍA CON SIMUSOL

Pablo Dellicompagni¹, Juan Francisco Linares^{1,2}

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina.

²Facultad de Ingeniería - Universidad Católica de Salta (UCASAL). Campo Castañares s/n. Salta, 4400, Argentina.

e-mail: pablodellicompagni@gmail.com; jflinares@ucasal.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta la primera versión de un modelo térmico, predominantemente convectivo, de un concentrador cilindro parabólico de baja entalpía. Dicho modelo se generó a través del programa Día ensamblando los componentes y la simulación se realizó mediante el programa Simusol. El concentrador tomado como caso de estudio consta de un absorbedor conformado por un tubo evacuado y en el cual se aloja un tubo de cobre en U por el cual circula el fluido caloportador. El modelo térmico se realizó segmentando el absorbedor y empleando ecuaciones de balance térmico. Además, se incorporan los balances térmicos correspondientes a los nodos de temperatura del fluido caloportador en cada segmentación tratando al fluido como una sustancia de cambio de fase. El modelo determina la temperatura de salida y potencia térmica. Esta primera versión del modelo indica que el concentrador logra alcanzar una temperatura de salida en torno al punto de ebullición del fluido caloportador y una potencia térmica entre 1500 W y 2000 W, para un caudal másico de 0,006 kg/s.

Palabras clave: Concentración solar, potencia térmica, simulación numérica, cambio de fase, Simusol.

INTRODUCCIÓN

Los concentradores cilindro parabólicos (CCP) o concentradores lineales con sección transversal parabólica, son una tecnología ampliamente utilizada en la generación de energía solar térmica. Estos sistemas aprovechan la radiación solar concentrándola a través de reflectores parabólicos en un receptor lineal situado a lo largo del foco del reflector (Duffie y Beckman, 2013). El receptor absorbe la radiación solar concentrada y la convierte en calor, que puede utilizarse para generar electricidad, calentar agua o generar vapor para procesos industriales.

Para el diseño, implementación y utilización de este tipo de equipos, es importante contar con un proyecto de estudio previo, donde se pueda trabajar con la morfología del equipo y con las variables de funcionamiento del mismo. En cualquier tarea de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, los recursos no son infinitos, por lo que es necesario contar con la posibilidad de trabajar con software específico donde podemos simular el funcionamiento, corroborar el desarrollo de las variables, modificar los parámetros necesarios y ajustar los modelos para luego llevarlos a la realidad. De esta forma reducimos los costos asociados y los errores de funcionamiento, no incurriendo en la práctica de la “prueba y error”.

Actualmente hay una gran cantidad de programas informáticos que se utilizan para la evaluación, cálculo y diseño de sistemas para la generación de energía a través de la radiación solar. Entre los más usados podemos mencionar al System Advisor Model (SAM) y TRNSys.

El programa SAM (Reeman et al., 2017) del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) dependiente del Departamento de Energía de EEUU, es un software de modelación técnico - económico que posibilita la realización de una amplia gama de cálculos relacionados con los sistemas empleados en la generación de energía mediante fuentes renovables. A través de esta herramienta es factible simular diversos tipos de sistemas, como los sistemas fotovoltaicos, de concentración solar y eólicos, entre otros. El software ofrece una variedad sustancial de opciones de aplicación y genera una extensa cantidad de información como resultado. Al utilizarse, se brinda la opción de seleccionar entre varios modelos de equipos comerciales, lo que a su vez permite ajustar los parámetros y valores de simulación de acuerdo con la elección realizada.

TRNSys (Almeida et al., 2014; Remlaoui et al., 2019; Lozano et al., 2007) es un software de simulación energética ampliamente utilizado para trabajar con sistemas térmicos. Los componentes utilizados se describen mediante algoritmos programados en FORTRAN y además cuenta con una interfaz gráfica para que el usuario pueda directamente seleccionar los diferentes módulos (TYPES) que constituyen el sistema energético. Su utilización es diversa, partiendo desde la simulación de sistemas sencillos de agua caliente a nivel sanitario, como así también el diseño y simulación de edificios, sistemas eólicos, sistemas de hidrógeno, fotovoltaicos, entre otros.

Como primer antecedente del uso de Simusol para sistemas de concentración solar, se puede mencionar a Altamirano (2014), quien analizó los diferentes procesos de transferencia de calor que ocurren en el absorbedor en diferentes prototipos Fresnel lineal construidos y con distintas configuraciones del fluido calo portador, como ser circulación de paso directo y con recirculación, con y sin tanque de acumulación. Simusol (Saravia et al., 2007) es un software que facilita la descripción y simulación numérica de diferentes circuitos físicos, en particular sistemas térmicos y de energía solar. Su utilización se realiza por etapas, donde en primera instancia se debe esquematizar el circuito térmico del sistema, definiendo los valores de los elementos cargados en diferentes cuadros de datos, las condiciones iniciales de los nodos de temperatura que involucran masa, la rutina de integración para la resolución de los cálculos y los parámetros a estudiar. Esta primera instancia se realiza mediante una interface grafica, o software, de acceso libre denominado Día, que permite ensamblar los componentes y formar los circuitos térmicos. En una segunda instancia se corre el programa, el cual interpreta los datos del circuito, realiza una simulación y cálculo de las variables de salida mediante una metodología de analogía con circuitos eléctricos y entrega los resultados a través de gráficos que pueden ser personalizados, como así la generación de un archivo de texto plano con los valores de las variables graficadas, para su posterior edición en hoja de cálculo.

En este trabajo, se presenta el modelo térmico de un CCP de baja entalpía realizado en Simusol. Se empleó una metodología de segmentación tanto del absorbedor como de la superficie reflectora, manteniéndose el flujo del fluido caloportador (agua) en una línea de modelización continua, que involucra la formulación los coeficientes adimensionales de Nusselt, Reynolds, Rayleigh y Prandtl como así las ecuaciones de balance térmico para una sustancia de cambio de fase según la metodología desarrollada por Dellicompagni et. al (2020). Se muestran los resultados, principalmente de temperatura de salida y la potencia térmica que alcanza el CCP modelado.

METODOLOGÍA

Previo a la realización del circuito térmico equivalente y la carga de datos en el software, es necesario contar con un modelo termofísico del funcionamiento del sistema, donde se planteen condiciones relacionadas al tipo de equipo, características geométricas de sus diferentes partes, sus propiedades físicas, las características del fluido caloportador y los mecanismos de transferencia de calor.

Descripción del equipo modelado

La Fig. 1 muestra el concentrador solar tomado para realizar la modelación numérica. El mismo consta de una superficie reflectora parabólica de aluminio pulido de alta reflectancia ($\rho=0,85$; tomado de Echazú et al., 2000). Esta superficie refleja y concentra los haces solares hacia el absorbedor, ubicado a 1,25 m de distancia focal. Este absorbedor es un tubo de borosilicato de alta resistencia al vacío, de los que se emplean en los colectores solares para calentamiento de agua, comúnmente conocidos como

termotanques o colectores de tubos evacuados. La cubierta exterior es de 5,8 cm de diámetro, mientras que el tubo interior es de 4,7 cm de diámetro y está recubierto con nitrato de aluminio $Al(NO_3)_3$. Dentro del absorbedor se aloja un conducto de cobre en forma de U, de 6,6 mm de diámetro externo y espesor de pared de 1 mm, en el cual el agua ingresa por un extremo y abandona el absorbedor por el otro extremo, incrementado su temperatura o cambiado al estado vapor. El área de apertura solar del equipo es de 5.41 m^2 y cuenta con un seguimiento solar en un eje, estando este eje de rotación orientado de Este a Oeste. Los algoritmos de seguimiento responden a las ecuaciones de geometría solar (Duffie y Beckman, 2013) y son codificados en una placa Arduino UNO, lo cual minimiza los costos tanto de hardware como software. La placa Arduino contiene un microcontrolador, una memoria, puertos de entrada y salida (E/S), y otros componentes electrónicos. El microcontrolador es el cerebro de la placa y es responsable de ejecutar el código de seguimiento solar. La memoria almacena el código y los datos que el microcontrolador necesita para funcionar.



Figura 1: CCP tomado como caso de estudio para su simulación. Área de apertura solar: 5.41 m^2 . Área de la cubierta de vidrio: $0,33 \text{ m}^2$. Área de absorbedor: $0,23 \text{ m}^2$.

Modelo termofísico

El modelo implementado responde mayormente a mecanismos de transferencia de calor por convección, aunque se han incorporado también las radiatividades que podrían tener mayor inferencia en las energías puestas en juego. Para el intercambio térmico entre la cubierta de vidrio y el ambiente se propone convección libre y radiación. En cuanto al intersticio entre los tubos de vidrio concéntricos del absorbedor, se plantea el mecanismo de radiatividad, por encontrarse este intersticio al vacío. Desde la pared interior al seno de aire del absorbedor, se contempla convección libre, seguida de la conductividad a través de la pared del tubo de cobre en U. El calor se transmite al agua en circulación mediante convección forzada.

Hipótesis de simulación

Para el modelado del CCP se tuvieron en cuenta las siguientes hipótesis:

- Se considera el tubo en U como si fuera recto, despreciando los efectos producidos por la curvatura al cambiar de dirección para el retorno del fluido caloportador.
- Se desprecia la conductividad de la cubierta exterior e interior del absorbedor. No así la conductividad a través de las paredes del tubo de cobre.
- La transmitancia solar de la cubierta exterior del absorbedor se considera constante, no siendo afectada por el ángulo de incidencia de los haces solares.
- La absorptancia del absorbedor interior se considera de valor constante.
- Se divide la longitud total del tubo de cobre en cuatro segmentos, de manera de discretizar las ganancias y pérdidas de energía conforme avanza el fluido caloportador.
- Se incorpora al modelo la reducción de la ganancia solar debida a la no iluminación de los extremos del absorbedor en las horas antes y después del mediodía solar.
- La relación de concentración corresponde a la geométrica en base a las superficies de colección y a la zona iluminada del absorbedor, siendo esta relación de concentración constante.

- El estado (líquido o vapor saturado) del agua en circulación se modela cómo una sustancia de cambio de fase.
- Se consideró al tubo de cobre inundado, sin presencia de burbujas de aire.
- El calor se transmite a través de los diferentes mecanismos en una dimensión y de forma radial.
- Se introdujo un coeficiente menor a 1, que contempla aquellos haces solares que no inciden en el absorbedor debido a las imperfecciones en la superficie reflectiva (abolladuras y deformaciones mecánicas).
- No se consideraron las pérdidas por desenfoque debido a la acción del viento sobre la estructura del CCP.
- No se considera para el cálculo al factor de intercepción de los haces solares debido a la estructura de soporte del absorbedor.
- El aire en el interior del absorbedor se desplaza a muy bajas velocidades.
- Se desprecian las conductividades a través de las paredes de los tubos de vidrio, no así a través de las paredes del tubo de cobre.

Descripción del modelo

La Fig. 2 (der.) muestra el modelo de intercambio térmico en el absorbedor. La irradiación solar concentrada llega a la cubierta exterior de vidrio, la atraviesa y alcanza al absorbedor interno propiamente dicho. Es este absorbedor el que transforma la irradiación en calor. Cómo entre ambas superficies existe vacío, sólo se consideró una transmisión de calor por radiación entre ellas. Este es el principal mecanismo de pérdida de calor hacia el exterior, que luego se transfiere al aire atmosférico por convección y radiación. Desde el absorbedor interno se produce transferencia de calor por convección hacia el aire interior y desde allí hacia la pared exterior del tubo de cobre mediante convección.

El agua ingresa en el tubo de cobre y arrastra el calor desde la pared interna mediante convección. La Fig. 2 (izq.) muestra cómo se segmentó este tubo de cobre obteniéndose así 5 secciones de control: una a la entrada, una a la salida y tres secciones intermedias. El fluido ingresa a una determinada temperatura y sale del tubo con una temperatura superior. Luego de abandonar el absorbedor, el fluido se encuentra expuesto al aire atmosférico.

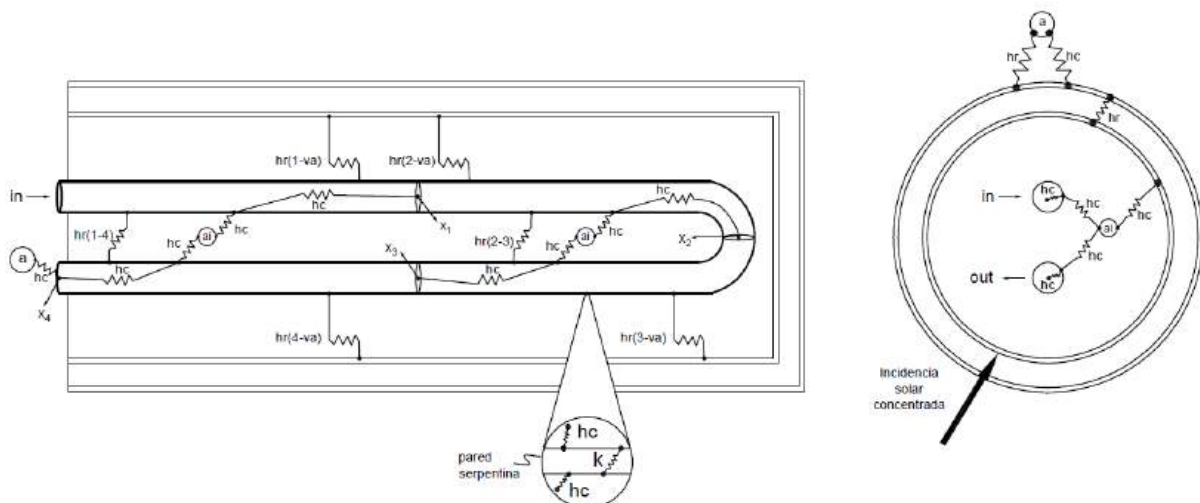


Figura 2: Modelo termofísico. Corte longitudinal (izq). Corte Transversal (der).

El programa Simusol emplea una interfaz gráfica en las cuales se debe ensamblar el modelo mediante figuras en forma de bloques que representan a los nodos de temperatura, los mecanismos de transferencia de calor, las masas asociadas a los nodos, las fuentes de energía como así de temperatura, entre otros componentes. La Fig. 3 muestran los componentes ensamblados que representan al modelo térmico aquí propuesto. Se debe remarcar que el absorbedor de vidrio (Fig. 3, arriba) se modeló de forma radial estableciendo los mecanismos de transferencia de calor entre el nodo de temperatura ambiente y el nodo de temperatura del aire en el interior, con el agregado de la incidencia de la irradiación solar en el tubo interior (absorbedor propiamente dicho). Vale decir, que el nodo de aire (ai) es el que reúne toda la energía térmica que luego será transferida al tubo en U. El tubo de cobre en U es el que se modeló de

forma discretizada, con el fin incorporar las ganancias de calor de forma parcial en cada segmento conforme el agua circula por dicho tubo (Fig. 3, abajo).

Toda la energía térmica acumulada en el nodo de aire interior se reparte en cuatro flujos de calor mediante convección natural hacia la pared exterior de cada segmento de caño. Luego el calor se transmite a través de las paredes mediante conducción, y nuevamente mediante convección hacia el seno del agua en circulación. Para la formulación de los mecanismos de convección se ha seguido la forma general establecida por la Ec. 1 (Bergman et al., 2011; Duffie y Beckman, 2013) para la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$h = Nu * \frac{k}{2*r} \quad (1)$$

En la que Nu corresponde al número de Nusselt, k es la conductividad térmica (W/m° C) y r es el radio de la superficie sobre la cual se realiza la transferencia de calor convectivo en m.

La forma que adopta la expresión para Nu depende del sistema o sistemas que intercambian calor, de las sustancias puestas en juego cómo así el régimen de circulación (laminar, de transición o turbulento), como así sí se trata de convección forzada (se trabaja con Reynolds, Ec. 2) o libre (se trabaja con Raleigh, Ec. 3) (Turcotte y Schubert, 2002).

$$Re = \frac{2 * v * r}{\nu} \quad (2)$$

$$Ra_{ai} = \frac{\beta(T_s - T_{\infty})gD_{cu}^3}{\nu \alpha} \quad (3)$$

Donde:

- v: Velocidad del fluido en cuestión, m/s.
- r: Radio de la superficie convectiva, m
- β : Coeficiente de expansión térmica, 1/K.
- T_s : Temperatura de la superficie, °C para convectividad, K para radiatividad.
- T_{∞} : Temperatura ambiente o del recinto en cuestión, °C.
- ν : Coeficiente de viscosidad cinemática, m²/s.
- α : Difusividad térmica del aire, m²/s.
- g: Aceleración de la gravedad, 9,81 m²/s.
- D_{cu} : Diámetro de la cubierta exterior de vidrio, m.

Otra consideración realizada dentro de las posibles pérdidas en la ganancia solar es el factor de no iluminación del absorbedor, cuantificada con el factor f_{end} y que afecta directamente en el término de ganancia solar. Este factor ha sido estudiado por Hongn (2016), basándose en Heimsath et al. (2014), adaptando dicho estudio para un sistema de concentración Fresnel Lineal. Si bien aquí la tecnología es cilíndro-parabólica, se encuentra que el mismo análisis puede realizarse involucrando las mismas ecuaciones. Para ello, se define al factor f_{end} mediante la Ec. 4.

$$f_{end} = 1 - \tan(|\theta_i|) \frac{H}{Z} \quad (4)$$

Donde:

- θ_i : Angulo de incidencia solar, comprendido entre el haz solar y el vector normal al plano de apertura, °.
- H: Distancia focal dónde el absorbedor está emplazado, m.
- Z: Longitud del absorbedor, m.

Si bien la Ec. 4 permite estimar el factor f_{end} para cualquier día y horario a través del ángulo θ_i , también, para ensayos de corta duración, puede registrarse la longitud no iluminada de forma experimental, a

efectos de realizar los cálculos. Para la presente simulación, se ha medido la longitud no iluminada para un día aleatorio (22/03/2023) y se determinó el correspondiente factor f_{end} (Fig. 4).

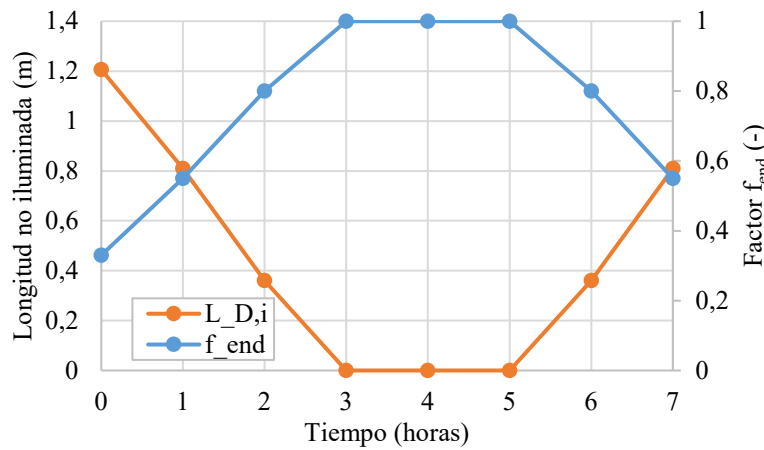


Figura 4: Longitud no iluminada y factor f_{end} para el día 22/03/2023, con una distancia focal $H=1,25$ m y una longitud de absorbedor de $Z=1,8$ m.

Se observa que el absorbedor se encuentra completamente iluminado en la franja horaria de 2 horas en torno al mediodía solar, por lo que las pérdidas por longitud no iluminada son nulas, o bien el factor f_{end} es igual a la unidad. Cabe mencionar que el eje de las abscisas corresponde al tiempo de ensayo y no al tiempo horario o reloj.

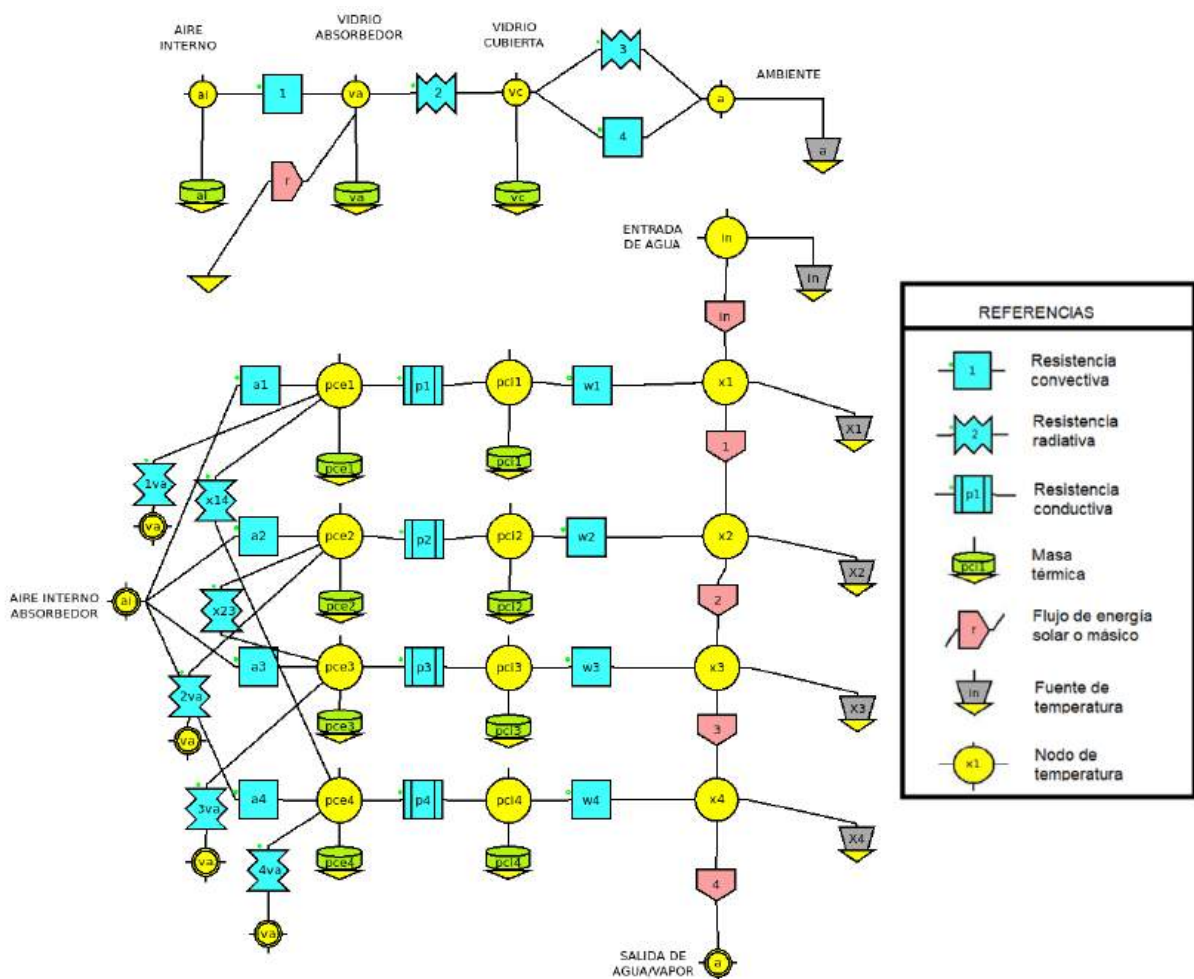


Figura 3: Modelo ensamblado en el software día. Absorbedor de vidrio (arriba) y tubo de cobre en U (abajo).

Transferencia de calor entre ambiente y cubierta de vidrio exterior

Si bien existe vacío entre la cubierta exterior y el tubo absorbedor propiamente dicho, aún debe considerarse el flujo de calor puesto en juego desde dicha cubierta y el aire exterior, tanto por convección como por radiación. Este flujo de calor se origina principalmente por radiación desde el absorbedor hacia la cubierta. Las Ecs. 5 y 6 corresponden al calor de intercambio entre cubierta y ambiente, por radiación y convección, respectivamente. La Ec. 7 es la misma que la Ec. 1 adaptada a sustancia aire, mientras que la Ec. 8 permite determinar el número Nu para un cilindro circular en flujo cruzado (Ramos González, 2007) conocida como la correlación de Churchill y Chu.

$$Q_{r-c} = \sigma \varepsilon A_{cu} (T_{cu}^4 - T_a^4) \quad (5)$$

$$Q_{c-c} = h_{cu} A_{cu} (T_{cu} - T_a) \quad (6)$$

$$h_{cu} = \frac{Nu_{cu} k_{ai}}{2 R_{cu}} \quad (7)$$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_{ai}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr_{ai}} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2, \text{ para } Ra_{ai} \leq 10^{12} \quad (8)$$

Donde:

- σ : Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.
- ε : Emisividad en el infrarrojo, adimensional.
- A_{cu} : Área exterior de la cubierta de vidrio, m^2 .
- h_{cu} : Coeficiente convectivo entre cubierta de vidrio y ambiente, $\text{W/m}^2\text{°C}$.
- k_{ai} : Conductividad térmica del aire, W/m °C .
- Re_{ai} : Número de Rayleigh para el aire, adimensional.
- Pr_{ai} : Número de Prandtl para el aire, adimensional.

Transferencia de calor entre absorbedor y aire interior

La irradiación solar concentrada atraviesa la cubierta exterior de vidrio, produciéndose una pequeña pérdida del recurso solar establecida por la transmitancia de dicha cubierta y su absortancia, y luego llega al absorbedor interior. Este, mediante sus propiedades térmicas, establecidas por la absortividad, transforma la ganancia solar en calor. Parte de este calor es transferido hacia el aire interior del tubo absorbedor, planteándose en este modelo un mecanismo de convección del tipo natural, ya que se considera que el aire en el interior del absorbedor se desplaza a muy bajas velocidades. La Ec. 9 permite determinar el número Nu para esta situación (Özişik, 1993).

$$Nu_{ai} = C Ra_{ai}^m \quad (9)$$

Donde C y m son coeficientes empíricos en función del número de Rayleigh. Para $10^4 \leq Ra_{ai} \leq 10^7$, $C=0,48$ y $m=0,25$.

Transferencia de calor entre tubo de cobre U y fluido caloportador

Dado las diferentes situaciones que pueden encontrarse en el estado de un fluido, se ha tomado como literatura base a Hongn (2016), en la que plantea diferentes expresiones para el número Nu en función del número de Reynolds (Ecs. 10-14).

$$Nu_{ag} = 4,36; Re_{ag} < 2300 \quad (10)$$

$$Nu_{ag} = 3,5239 \left(\frac{Re_{ag}}{1000} \right)^4 - 45,148 \left(\frac{Re_{ag}}{1000} \right)^3 + 212,13 \left(\frac{Re_{ag}}{1000} \right)^2 - 427,45 \left(\frac{Re_{ag}}{1000} \right) + 316,08 \quad (11)$$

$2300 < Re_{ag} < 3100$

$$\text{Nu}_{\text{ag}} = \frac{(f/8)(\text{Re}_{\text{ag}}-1000) \text{Pr}_{\text{ag}}}{1+12,7(f/8)^{0,5} (\text{Pr}_{\text{ag}}^{0,667}-1)}; 3100 < \text{Re}_{\text{ag}} < 10^4 \quad (12)$$

$$\text{Nu}_{\text{ag}} = \frac{(f/8)\text{Re}_{\text{ag}} \text{Pr}_{\text{ag}}}{1,07+12,7(f/8)^{0,5} (\text{Pr}_{\text{ag}}^{0,667}-1)}; \text{Re}_{\text{ag}} > 10^4 \quad (13)$$

$$f = (0,079 \ln \text{Re}_{\text{ag}} - 1,64)^{-0,5} \quad (14)$$

Modelo de cambio de fase del agua

Como se mencionó, se adoptó la metodología de Dellicompagni et al. (2019) para determinar la temperatura de los nodos de agua que circula por el interior de los segmentos en los cuales el tubo en U esta discretizado. Esto se logra dado que se consideró a la convección como el principal mecanismo de transferencia de calor en el seno del fluido, despreciando los esfuerzos de corte originados por la viscosidad dinámica como así las variaciones de momentos al considerarse que el agua fluye de forma uniforme sin vórtices ni remolinos. La variación temporal de la temperatura de cada nodo de agua en circulación surge del balance energético y está determinado por la Ec. 15.

$$\frac{\partial T_{\text{ag},i}}{\partial t} = [\sum \dot{Q}_i - m_{\text{ag}} \dot{H}_{\text{ag}}(1 - \beta_m)] \left[\frac{1}{1 + \beta_m m_{\text{ag}} C_{p,\text{ag}}} \right] \quad (15)$$

Donde.

$T_{\text{ag},i}$: Temperatura del nodo de agua, °C.

$\sum \dot{Q}_i$: Es la sumatoria de los flujos de calor (potencias térmicas) que entran y salen del nodo de temperatura, W.

m_{ag} : Masa de agua contenida en cada segmento de cañería, kg.

\dot{H}_{ag} : Es el calor latente de vaporización del agua, W/kg.

$C_{p,\text{ag}}$: Capacidad calorífica del agua, J/°C kg.

β_m : Es un parámetro adimensional igual a 0 cuando sucede el cambio de estado y 1 cuando no.

Para cada segmento en los que se dividió el tubo de cobre en U, y para cada nodo representativo en la Fig. 3 (abajo), se asocia una fuente de temperatura, cuyo valor se calcula mediante la Ec. 15.

La potencia térmica del equipo CCP, en W, se determina con la Ec. 16, contemplando ambas instancias de calentamiento sensible y latente (vaporización)

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{\text{ag}} C_{p,\text{ag}} (T_s - T_{\text{in}}) \beta_m + \dot{m}_{\text{ag}} h_{l,v} (1 - \beta_m) \quad (16)$$

Donde.

\dot{m}_{ag} : Caudal másico del fluido caloportador, kg/s.

T_s : Temperatura de salida del fluido caloportador, °C.

T_{in} : Temperatura de entrada del fluido caloportador, °C.

$h_{l,v}$: Calor de cambio de fase liquido a vapor para el agua, J/kg.

En cuanto a la temperatura de ebullición, ésta depende de la presión. Pero como la salida del absorbedor se encuentra conectada al ambiente exterior sin ninguna válvula o ninguna otra obstrucción, la temperatura de ebullición depende, en definitiva, con la altura sobre el nivel del mar (asnm) (Negret, 1986; Güemez et al., 2002). Se tiene, según la Ec. 17, que la temperatura de ebullición para una asnm = 1180 m, será de 95,87 °C.

$$T_{\text{eb}} = -0,0034 * (\text{asnm}) + 99,884 \quad (17)$$

RESULTADOS

Se hizo correr el modelo planteado en Simusol. Para ello, previamente se introdujeron los parámetros climáticos como ser temperatura ambiente y velocidad de viento medidos, mediante tablas horarias que son incorporadas al cuerpo del software *Dia*. Además, se incorporó la irradiancia solar medida en la dirección perpendicular al plano de colección, como así el caudal másico. Otro requisito para la simulación es definir las temperaturas iniciales de todos los nodos que tengan asociados una masa térmica, cómo así para las ecuaciones diferenciales que calculan la temperatura del agua en cada uno de los segmentos discretizados. Se realizó la simulación durante 7 horas de trabajo, mostrándose los resultados en la Fig. 4. Con respecto al caudal másico de agua, se consideró un valor constante de 0,006 kg/s.

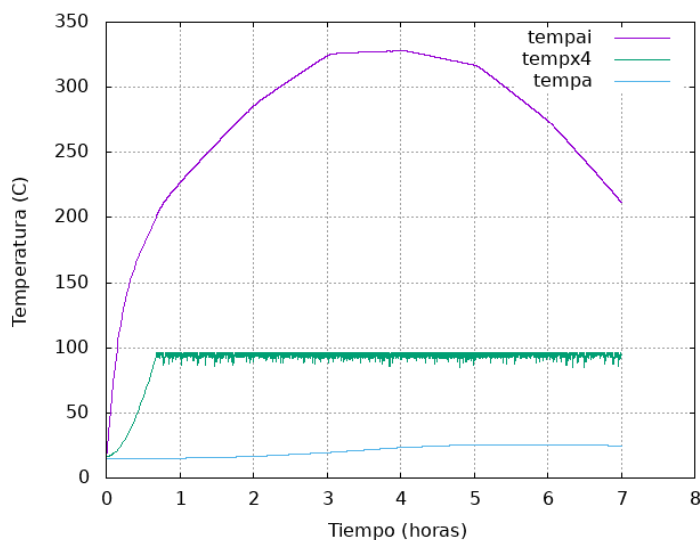


Figura 4: Temperatura interna del absorbedor (*tempai*), de salida (*tempx4*) y ambiente (*tempa*).

Puede observarse que la temperatura del agua alcanza su punto de ebullición, pero no supera a ésta dado que el vapor es liberado al ambiente. El punto de ebullición, para una asnm de 1180 m es de 95,87 °C y la presión atmosférica corresponde 0,88 bar. Por otro lado, puede verse que el salto térmico es de 75 °C aproximadamente, dado que se consideró a la temperatura de entrada igual a la temperatura ambiente. Otro resultado observable es la variación de la temperatura dentro del absorbedor, es decir en la cama de aire, que alcanza los 330 °C.

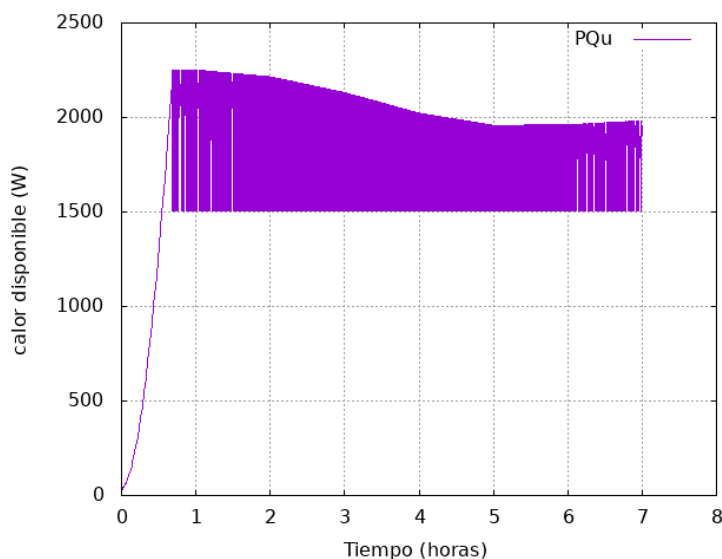


Figura 5: Calor útil o potencia térmica.

En cuanto a la potencia térmica del equipo, se logra superar los 2000 W en primera instancia, y luego se estabiliza entre 1500 W y 2000 W. Se observa la variación del calor útil debido a la variación del estado del agua de salida. Esta variación se debe a la oscilación de la temperatura al producirse vapor a presión atmosférica.

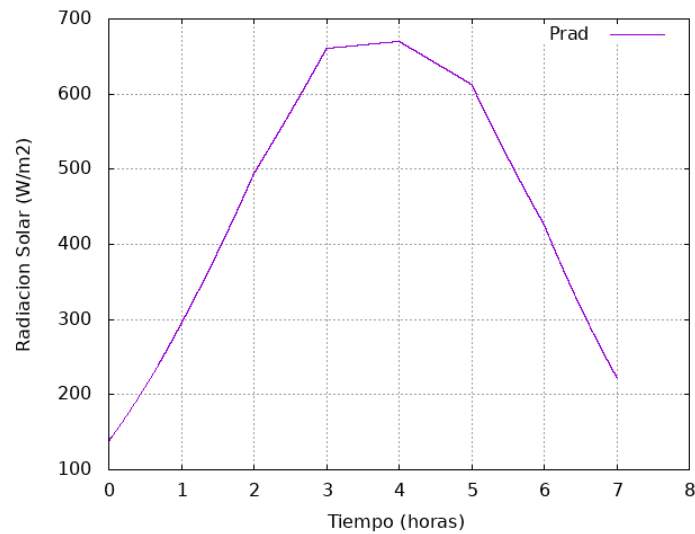


Figura 6: Radiación solar incidente.

La Fig. 6 muestra los valores de irradiancia medidos en el plano de colección solar, o apertura. Se dispuso de una potencia solar de 650 W/m^2 en torno al mediodía solar, lo que da una potencia solar de *ingreso al concentrador* de aproximadamente 3500 W considerando que, en la franja horaria del mediodía solar, los haces ingresan de forma perpendicular a la apertura. Según los resultados del modelo, si el fluido caloportador desarrolla una potencia térmica entre 1500 W y 2000 W , la eficiencia solartérmica del equipo podría rondar entre 40% y 57% en el mencionado rango horario, y luego descender dado que el concentrador no cuenta con seguimiento en el eje azimutal.

Los resultados logrados con el modelo hasta aquí desarrollado se encuentran dentro del orden con resultados experimentales del equipo, pero con diferente absorbedor (en lugar de tratarse de un tubo en U, se trabajó con un serpentín helicoidal) publicados en Franco y Dellicompagni (2020). En tales ensayos se empleó un caudal másico de $0,002 \text{ kg/s}$ habiéndose desarrollado una potencia térmica de 1250 W . Como la dependencia de la potencia térmica con el caudal másico es lineal, resulta razonable llegar a valores numéricos de 2000 W de potencia térmica para un caudal levemente superior. No obstante, como el fluido caloportador se encuentra *conectado* a la atmosfera en su salida, la temperatura no superará a la de ebullición, lo que se deriva en una limitación de la potencia térmica aprovechable del equipo CCP, y esto se ve reflejado en las curvas de temperatura de la Fig. 4.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo termo físico basado en mecanismos principalmente convectivos de un sistema de concentración solar del tipo cilindro parabólico de baja entalpía. Asimismo, se ha incorporado las ecuaciones de balance energético y de cambio de fase para la determinación de la temperatura del fluido caloportador a lo largo de su trayectoria en el interior del tubo de cobre alojado en el absorbedor. Se considera que el modelo realizado es relativamente sencillo, dadas las hipótesis de simulación planteadas, pero, aun así, los resultados a los que se arriban son razonables para la envergadura de la tecnología estudiada.

Si bien los resultados numéricos no se validaron estrictamente de forma experimental, los primeros resultados a los que se arriban con el modelo propuesto son razonables si se comparan los valores de potencia térmica que el modelo desarrolla, con resultados de ensayos previos del equipo construido en la práctica, aunque con diferencias en el diseño del absorbedor. Se toma como referencia de que, para caudales relativamente bajos, el CCP ensayado desarrolla una potencia térmica de 1250 W , pudiéndose

ésta ser incrementada hasta 1500 W o superior, según los resultados numéricos conseguidos con el modelo, con mayores caudales. No obstante, se plantea como trabajo a realizar en un futuro la validación del modelo continuando con los ensayos experimentales del equipo y estudiando de forma parametrizada (con variaciones de caudal y presión de salida) las diferentes variables de interés como ser temperatura de salida, potencia térmica desarrollada, o bien la introducción de mejoras constructivas en cuanto al absorbedor.

REFERENCIAS

- Almeida P., Carvalho M. J., Amorim R., Mendes J. F., Lopes V. (2014). Dynamic testing of systems – Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy* Volume 104. Pages 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.010>.
- Altamirano M. (2014). Estudio de absorbedores para la generación de energía eléctrica mediante un reflector lineal tipo Fresnel. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Argentina.
- Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P. and Dewitt D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. John Wiley and Sons. 2011.
- Dellicompagni P., Franco J., Heim D. y Wieprzkowicz A. (2020). Numerical modeling of phase change materials using simusol software. *Applied Thermal Engineering*, 170, 114772. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114772>.
- Duffie J., Beckman W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Echazú R., Cadena C., Saravia L. (2000). Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 11–16.
- Franco J., Dellicompagni P. (2020). Concentrador solar cilindro-parabólico de bajo costo, para la provisión de energía térmica para pequeña y mediana industria. XVII Congreso Ibérico e XIII Congreso Ibero-americano de Energía Solar.
- Freeman J. M., DiOrío N. A., Blair N. J., Neises T. W., Wagner M- J., Gilman P., Janzou S. (2017). System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2017.9.5). United States. <https://doi.org/10.2172/1440404>.
- Güemes J., Fiolhais C., Fiolhais M. Revisiting Black's experiments on the latent heats of water. *The Physics Teacher* Vol 40. January 2002. pp. 26-31. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1457825>.
- Heimsath A., Bern G., van Rooyen D., Nitz P. (2014). Quantifying optical loss factors of small linear concentrating collectors for process heat application. *Energy Procedia*, 48, 77–86. doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.010.
- Hongn M. (2016). Estudio y evaluación de parámetros de funcionamiento para la tecnología Fresnel lineal de concentración. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Argentina.
- Özişik M. N. (1993). *Heat conduction*. John Wiley & Sons Ltd.
- Lozano M. A., Renin L., Guallar J., Monné C., Ramos J. (2007). Análisis energético del funcionamiento de un sistema de climatización solar con TRNSYS. V Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica. Vigo. http://publicationslist.org/data/miguel.a.lozano/ref-67/cc52_Vigo_Ref21_Solar.pdf
- Negret J. P. Boiling Water and the Height of Mountains. *The Physics Teacher*. May 1986. pp. 290-292. <http://dx.doi.org/10.1119/1.2342018>.
- Remlaoui A., Benyoucef M., Ass D. (2019). A TRNSYS dynamic simulation model for a parabolic trough solar thermal power plant. *International Journal of Energetica*. Vo4. No 02.10/11/2019. <http://dspace.univ-eloued.dz/handle/123456789/22731>
- Ramos González J. C. (2007). *Fórmulas, tablas y figuras de transferencia de calor*. Universidad de Navarra, Escuela Superior de Ingenieros.
- Saravia L., Alía de Saravia D., Echazú R., Alcorta G. (2007). La simulación de sistemas termo mecánicos solares con el programa Simusol. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 11:03.01-3.08.
- Turcotte D., Schubert G. (2002). *Geodynamics* (2nd edition). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S0016756802217239>.

NUMERICAL SIMULATION OF A LOW ENTHALPY PARABOLIC TROUGH CONCENTRATOR USING SIMUSOL SOFTWARE

ABSTRACT: This paper presents the first version of a thermal model, predominantly convective, of a low-enthalpy parabolic trough concentrator. This model was generated using the Day program where the components were assembled, and the simulation was performed using the Simusol program. The studied concentrator consists of an absorber formed by an evacuated tube in which a U-shaped pipe is housed through which the heat transfer fluid flows. The thermal model was performed by segmenting the absorber and using thermal balance equations. In addition, the thermal balances corresponding to the temperature nodes of the heat transfer fluid in each segmentation are incorporated, considering the fluid as a phase change substance. The model determines the output temperature and thermal power. This first version of the model indicates that the concentrator can reach an exit temperature around the boiling point of the heat transfer fluid and a thermal power between 1500 W and 2000 W, for a mass flow rate of 0.006 kg/s.

Keywords: Solar concentration, thermal power, numerical simulation, phase changing, Simusol.

ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN DOS COLECTORES SOLARES CON ACUMULACIÓN INTEGRADAS, CONSTRUIDOS CON SIMILARES MATERIALES Y MÉTODOS

Juan M. Lucchini¹, Javier H. Garnica¹, Jorge R. Barral¹, Jorge M. Morsetto¹

¹Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto

Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto

Tel./Fax: (0358) 4029055 - e-mail: mlucchini@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se analizan problemas de oxidación que ocurrieron en dos equipos de calentamiento de agua mediante energía solar, que son prototipos de colectores solares con acumulación integrada. Los equipos son geoméricamente diferentes, pero han sido construidos con materiales similares. Se concentra el estudio en cada absorbedor-almacenador, para los cuales se ha utilizado chapa de acero negro como materia prima principal. Dichos equipos, que funcionaron muy bien térmicamente, presentaron pérdidas de agua al cabo de unos años por perforaciones causadas por oxidación. La diferencia en los intervalos de tiempo en que ocurrieron las perforaciones motivó el presente estudio, ya que en uno de ellos el intervalo fue bastante más corto. En búsqueda de las razones que ocasionaron estos problemas, los equipos fueron desmontados de sus aplicaciones rutinarias, y sus componentes absorbedor-almacenador fueron cortados y abiertos en sectores críticos. Se analizaron los contenidos de las aguas que alimentaban los equipos y se recurrió a distintos índices característicos para observar si las aguas presentaban características corrosivas o incrustantes. También se analizaron posibles mecanismos de corrosión y mecanismos de protección, como pintado con antióxido y ánodos de sacrificio. Por último, se presentan conclusiones sobre posibles causas de corrosión, proponiéndose maneras de prevenirla.

Palabras clave: colector solar, acumulación integrada, dureza del agua, corrosión.

INTRODUCCIÓN

Un colector acumulador integrado (CAI) es parte de una instalación de agua caliente domiciliar que combina las funciones de absorción de radiación solar y almacenamiento de energía. Consta de un tanque (o tanques), pintados de negro o con una cubierta selectiva, encerrados en una caja aislada, y cubiertos por una superficie transparente. El absorbedor-almacenador está permanentemente lleno de agua, y por la gran masa térmica de agua, almacena energía. Cuando el agua caliente es demandada, se extrae agua caliente de la parte superior del equipo, y ésta es reemplazada por agua proveniente de la red o tanque convencional de almacenamiento del edificio. (Duffie et al., 2020).

El Grupo de Energía Solar de la UNRC (GES) ha trabajado experimentalmente y analíticamente con distintos modelos de colectores solares con acumulación integrada (CAI): tubulares (Barral et al., 2002), mono tanques con varias cubiertas (Fasulo et al., 2001), bi tanques con superficies reflectantes (Stoll et al., 2007), de sección oval (Garnica et al., 2011) (Garnica et al., 2017) y parcialmente aislados (Garnica et al., 2019). Los aspectos constructivos, detalles de principios de funcionamiento y estudios realizados están detallados en cada una de las publicaciones mencionadas. En el avance de estos estudios surgieron como más convenientes los dos últimos modelos, el de sección oval (CAI oval) y el parcialmente aislado (CAI pa), por lo que, en pos del mejoramiento de la vida útil de los mismos, se realiza aquí este estudio sobre corrosión de estos dos equipos.

En los dos últimos modelos, CAI oval y CAI pa, se utilizó chapa de acero negra con un pintado interior; ya que este tipo de chapa se utiliza en calefones a leña que soportan duras condiciones de altas temperaturas y presentan diez o más años de uso. Desde la fabricación del prototipo CAI pa hasta la fecha han pasado cinco años (2019-2023), en dicho periodo el equipo funcionó continuamente y en los últimos meses presentó fugas de agua, lo que llevó a realizar la pregunta ¿A qué se debe estas fugas tempranas?, ya que estos equipos tienen una expectativa de vida útil superior a los diez años. Por otra parte, nos encontramos que el prototipo CAI oval, a pesar de tener más de doce años (2011-2023) de uso y estar construido con técnicas y materiales similares, presentaba menor degradación.

En este trabajo se dilucida el motivo del acelerado deterioro del equipo CAI pa. Para ello se revisó el estado de los dos equipos, realizando inspecciones visuales y con cámara endoscópica sin desarmar el equipo para después, desarmarlos y realizar disecciones de las partes atacadas a fin de estudiar el proceso de oxidación. En lo que sigue del artículo, se hace una descripción de los equipos, se identifican los problemas de oxidación, los cuales se documentan con fotos, y se analizan las probables causas de los mismos.

DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Los dos equipos fueron pintados con pintura antióxido al agua, a fin de cuidar la calidad del agua por la posible contaminación, tanto en la parte interior como la exterior (tanto el colector-acumulador como el colector y tanque). Luego, en el exterior de ambos equipos, se colocó una capa extra de pintura sintética de color negro mate. También a los dos equipos se colocaron dos ánodos de magnesio de 0,5 m cada uno, como protección galvánica. A diferencia del CAI oval, el CAI pa fue provisto de dos resistencias calefactoras (de 1500 W) en la parte baja del tanque, a fin de contar con un respaldo térmico en situaciones de días de baja radiación y/o elevada demanda de consumo. En ambos equipos se procedió a aislarlos con lana de vidrio de 0,05 m y encapsularlos en una carcasa de chapa galvanizada (el equipo oval además posee como aislante una capa de poliestireno expandido), mientras que la parte que enfrenta al sol para captar la energía, en ambos equipos fue cubierta con un policarbonato alveolar de 0,006 m de espesor, en las Fig. 1 y Fig. 2 se observan los equipos y esquemas.

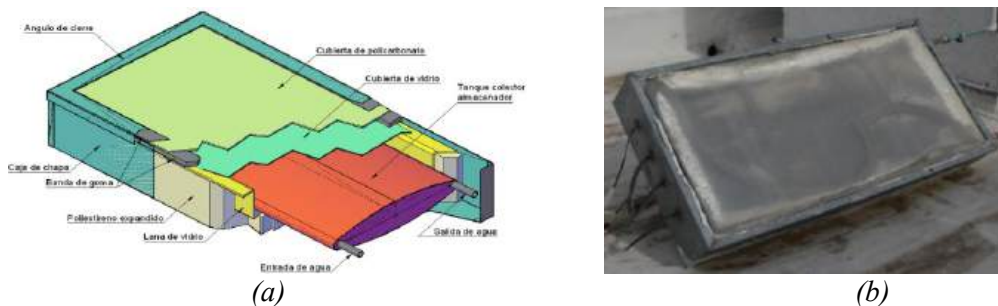


Figura 1: CAI oval (a) Corte esquemático (b) Equipo armado en plataforma de medición



Figura 2 CAI pa (a) Esquema del interior (b) Foto del cuerpo interior

Problemas de corrosión identificados.

Se identifican en la Fig. 2 b, tres puntos (I, II y III) en los cuales se localizaron pérdidas de agua. Estos lugares de pérdidas se muestran ampliados en la Fig. 3a, 3b y 3c.

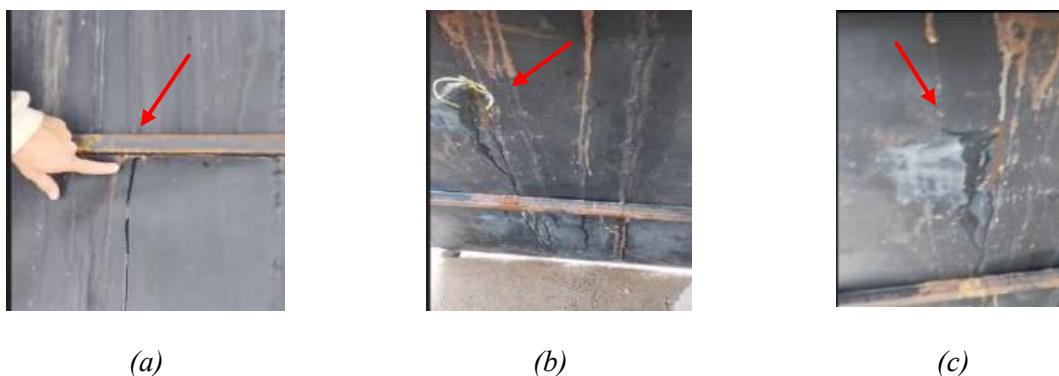


Figura 3 Pérdidas de agua en el CAI pa (a) en la parte anterior (b) y (c) en la parte posterior

Al CAI oval, que sólo mostraba problemas de haberse movido los burletes aislantes de su posición, al no poder obtener imágenes con la cámara endoscópica por la entrada o salida de agua, se decidió desarmarlo a fin de exponer el tanque oval y poder extraer el ánodo de sacrificio para su análisis.

En los dos CAI, las distintas partes del equipo se fijan entre sí por piezas de madera. En el CAI oval estos soportes (principalmente los inferiores estaban deteriorados por el contacto permanente con las pérdidas de agua). En las Fig. 4 a b y c, se muestra el estado de deterioro de la parte inferior de la abrazadera que unía el tanque oval con el chasis y la madera.

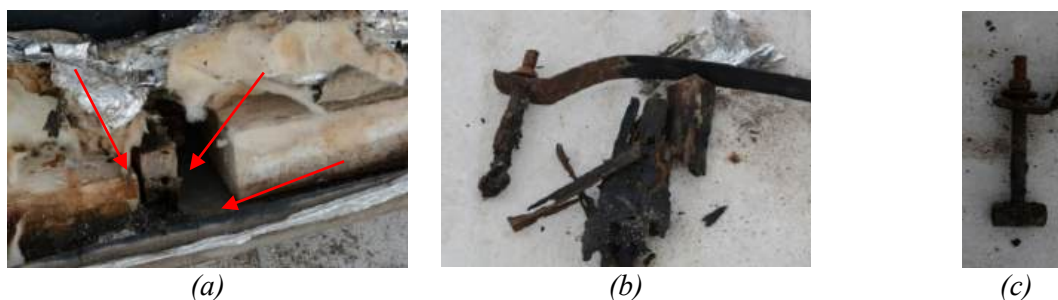


Figura 4 CAI oval (a) Indicio de deterioro en soportes de madera (b) y (c) anclajes deteriorados.

Continuando con el análisis, al extraer los ánodos de sacrificio de magnesio en sendos tanques, que se muestran en las Fig. 5 a, b, c y Fig. 6 a, se observó que el magnesio había reaccionado totalmente y se consumido, por lo que ya no brindaba protección anódica. Cabe destacar que en otro equipo CAI pa (gemelo al estudiado), a los tres años se le realizó el cambio del ánodo de sacrificio y todavía tenía más de la mitad de magnesio, por lo que la protección catódica debería durar como mínimo más de 5 años. En el caso mostrado, se deduce que el ataque al ánodo de sacrificio fue más intenso.

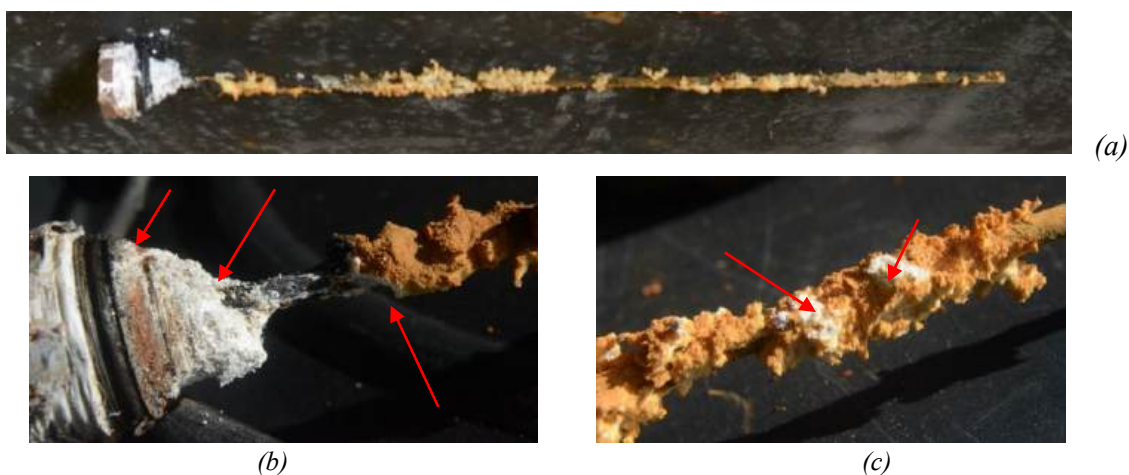


Figura 5 Ánodo de sacrificio (a) Vista total (b) Sales de magnesio (c) Óxidos marrones depositados

En el caso de las resistencias eléctricas, Fig. 6 b y c, en el CAI pa, se observó que estaban en funcionamiento y no presentaban incrustaciones de sarro. Lo que llamó la atención es que las incrustaciones se encontraban en la vaina que portaba la termocupla para censar la temperatura, ésta presentaba un color blancuzco (probablemente sarro incrustado).

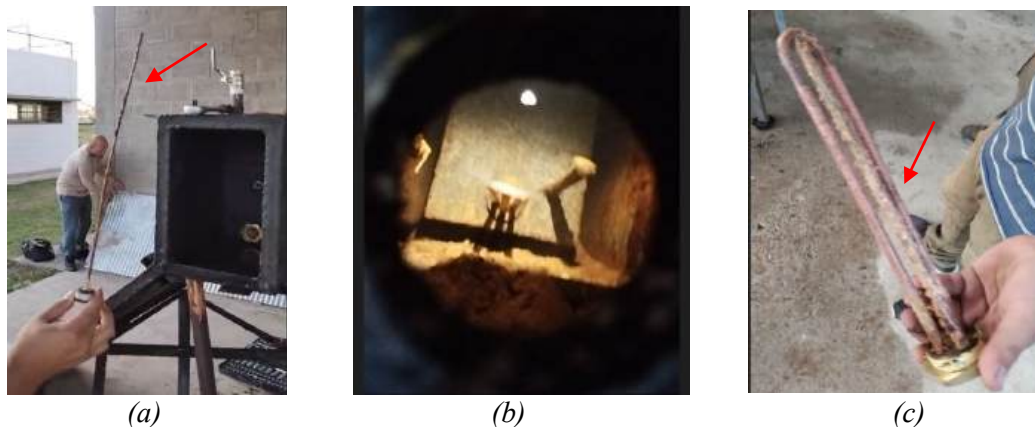


Figura 6 CAI pa (a) Ánodo de sacrificio (b) Vista al tanque desde el acople de la resistencia (c) Resistencia con la vaina de termocupla

Cabe también mencionar el proceso de pintado en el interior de los equipos, el cual fue realizado con pintura antióxido con base acuosa. Dicho proceso consistió en colocar un volumen de cinco litros de pintura dentro del equipo, cerrar todas las entradas del mismo y una vez suspendido mediante aparejos, mover el equipo de manera de mojar con pintura todas las superficies interiores, para asegurarse la correcta impregnación de dichas superficies. Este procedimiento se realizó dos veces, dejando suficiente tiempo para el secado de la pintura en el interior.

También el CAI oval presentó problemas de aislación térmica, producto de un sobrecalentamiento en verano que no estuvo en funcionamiento, ello se evidencia por la degradación térmica del poliestireno expandido (Fig. 7 a, b y c). Al extraer el tanque oval se notó que, en la parte posterior, (Fig. 8 a, b y c), presentaba una zona de herrumbre y posibles perforaciones causadas por oxidación por lo que se decidió examinarlo también por disección.

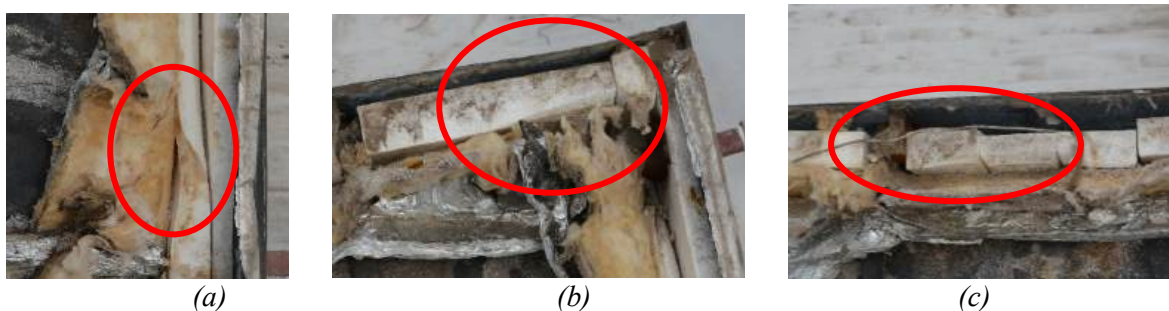


Figura 7: CAI oval (a) (b) y (c) Vista de la degradación térmica del poliestireno expandido.

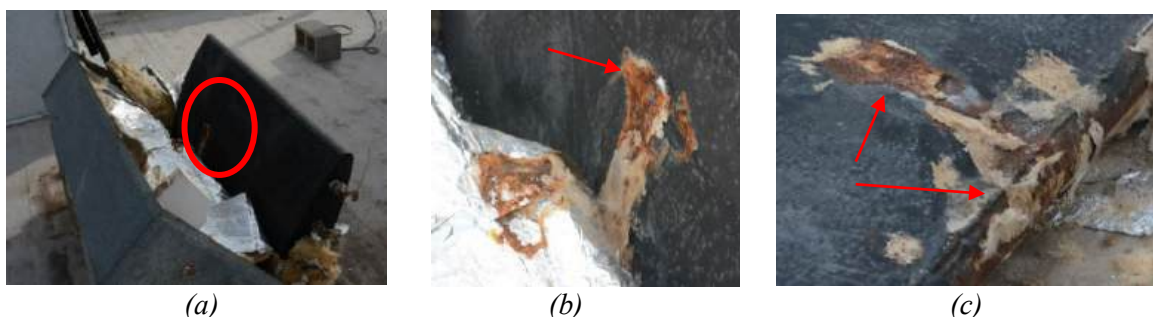


Figura 8: CAI oval (a) Vista de la parte posterior (b) y (c) zona de óxido localizada.

Análisis de problemas identificados mediante disección

En las Fig. 9 a y b se muestran las distintas disecciones realizadas a los dos equipos. En el CAI pa se decidió por un corte a la altura del tanque y tres en el colector a distintas alturas, la primera para ver el interior del tanque y las otras para poder observar la corrosión en las distintas alturas y la presencia de precipitados en el fondo del colector. En el CAI oval se realizaron dos cortes a fin de exponer la principal picadura, luego de su análisis visual en el exterior.

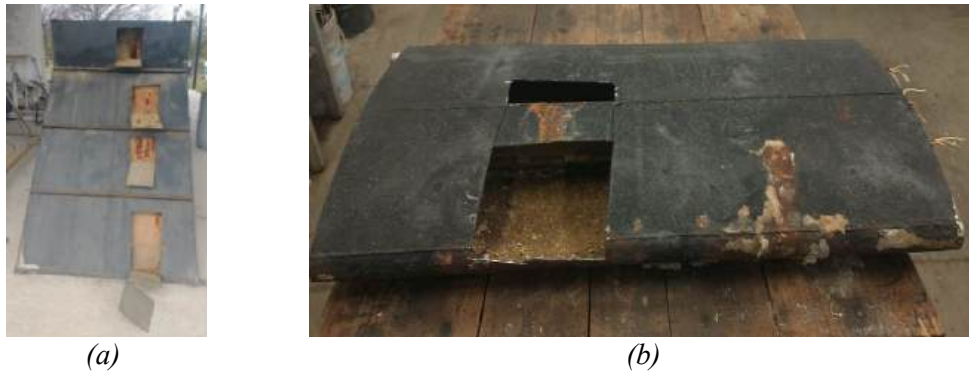


Figura 9 Cortes de inspección (a) en el CAI pa y (b) en el CAI oval

En el CAI pa se observaron, primero por una cámara endoscópica, distintas situaciones, (Fig. 10 a b y c). La primera, es que en la entrada de agua fría hay una deposición de gran cantidad de sarro en el interior de la cañería, lo cual se debe al contacto de dicha cañería con el agua muy caliente del tanque. Por otro lado, se observa que la cañería de salida de agua caliente no presenta mayormente incrustaciones. Por último, se ve que en el tanque debajo de los ánodos de sacrificio se encuentra gran cantidad de precipitados blanquecinos (se presume que son sales de magnesio).

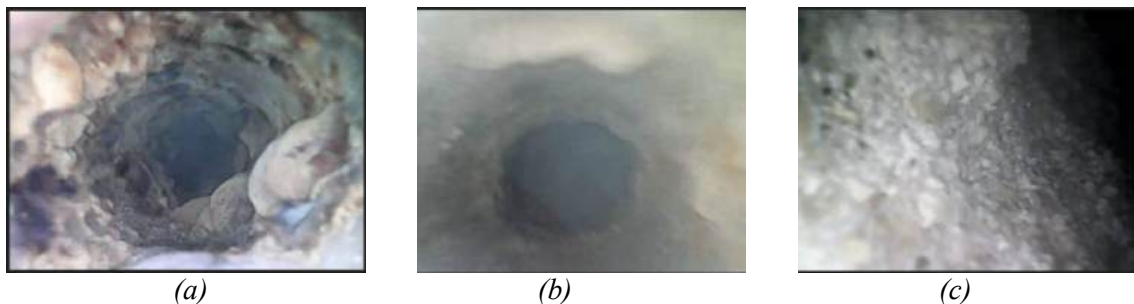


Figura 10 CAI pa (a) Entrada de agua con sarro (b) Salida de agua sin sarro (c) Fondo del tanque.

En el CAI oval, con la cámara endoscópica se observó una entrada y salida sin mucha incrustación. Fue dificultoso obtener imágenes del interior por la existencia de un difusor colocado en la entrada para evitar que el flujo entrante rompa la estratificación. Luego, al revisar los interiores de los CAIs, Fig. 11 a, b y c, se observaron con mayor claridad los indicios de precipitados y deterioros por oxidación, los precipitados fueron más abundantes en el fondo del tanque del CAI pa que en el CAI oval, lo mismo que las ampollas formadas por óxidos.

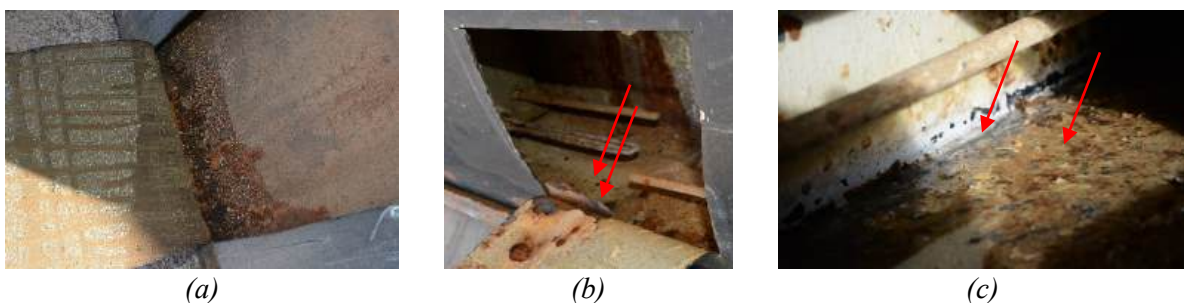


Figura 11: Precipitados (a) en el fondo colector del CAI pa (b) en el fondo del tanque del CAI pa (c) Interior del CAI oval con precipitados.

Los tanques estaban ubicados en dos sitios diferentes de la ciudad de Río Cuarto, El CAI pa en el barrio Castelli (ubicado al Sur Oeste de la ciudad) provisto de agua de red de la ciudad de Río Cuarto, la cual proviene principalmente, de una galería filtrante ubicada bajo el nivel del río a 25 km de Río Cuarto hacia el Oeste (estando clorada) y el CAI oval en la locación del GES dentro de la UNRC y el agua es provista por un pozo de 30 metros de profundidad ubicado en el predio.

Causas probables de la corrosión

Según Trujillo (Trujillo et al., 2008) que explica los fenómenos de corrosión y de incrustación, estos están relacionados directamente con las características fisicoquímicas del agua, su velocidad y tiempo de retención hidráulico, así como del material que está en contacto. Específicamente, la alcalinidad, pH y los residuos de desinfectantes son los principales factores que influyen en el proceso de corrosión. Concentraciones bajas de alcalinidad favorecen la solubilidad del CO_2 , incrementando la agresividad.

En los sistemas de distribución cuya base es el hierro, se presentan componentes asociados a los productos de corrosión como goetita (o goethita) ($\alpha\text{-FeOOH}$ – Marrón-Pardo rojizo - Insoluble), lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$ – Rojo-Pardo negruzco - Insoluble), magnetita (Fe_3O_4 – Negro grisáceo - Insoluble) maghemita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ – Pardo oscuro - Insoluble), óxido ferroso (FeO - Negro - Insoluble), siderita (FeCO_3 – Pardo amarillento-Gris verdoso- Poco soluble), hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ – Verdusco – Soluble - Inestable), ferrihidrita ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ – Marrón Oscuro-Marrón amarillento - Insoluble), carbonato de calcio (CaCO_3 – Blanco – Poco Soluble) y compuestos ferroso-férricos que incluyen Cl^- , SO_4^{2-} o CO_3^{2-} . Los contaminantes asociados al hierro o acero galvanizado o fundido son hierro, zinc, cadmio y plomo. (Navarrete Cueva, 2007).

Asimismo, Navarrete (Navarrete Cueva, 2007) analiza el efecto del papel de la capa protectora y su influencia en el mecanismo de la corrosión. Debemos tener presente que un revestimiento brinda tres mecanismos de protección a- electroquímico, b- fisicoquímico y c- de adhesión, donde es común que participen estos tres principios. El primero está relacionado con la presencia de pigmentos activos y son indispensables para la protección ya que un revestimiento orgánico no es impermeable al agua. Desafortunadamente iones de cloruros, sulfatos o nitratos realizan una acción contraria a los anticorrosivos o inhibidores. El segundo consiste en el bloqueo de los agentes corrosivos como el agua, el oxígeno o los estimulantes de la corrosión. El tercer mecanismo está relacionado en cómo se adhiere la capa orgánica al metal (es fundamental la preparación de la superficie como desengrasado, eliminación o pasivación de óxidos, etc. y se debe asegurar que existan un gran número de sitios reactivos sobre el metal disponibles para reaccionar con el revestimiento que, además, debe ser efectivo en condiciones de presencia de agua.

Corrosión debajo de un film de pintura

A continuación, se estudiaron posibles mecanismos de corrosión debajo de un film de pintura, principalmente como resultado del transporte de agua dentro de éste. La corrosión aquí puede deberse a la pérdida de adhesión del film, por humedad, o sin pérdida de adhesión, que se muestran en los esquemas de las Fig. 12 a y b. En el primer caso comienza en sitios no adheridos a causa de la ruptura de los enlaces por la presencia de agua, lo que causa el acceso de sales corrosivas, estableciendo así pilas de corrosión. La penetración de agua y sustancias iónicas trae consecuencias mecánicas como la ruptura del film. En caso de no perder adhesión el film, varios mecanismos propuestos se centran en la permeabilidad del film y en la presencia de discontinuidades (aberturas o defectos). La acumulación de agua en estos sitios contribuye eventualmente al rompimiento del film y permitir la dispersión del electrolito debajo de éste para un mayor ataque.

Por otra parte, los mecanismos de corrosión explicados en la bibliografía (Mata Bravo, 2011) (Maquinarias Pesadas, 2023) destaca que la corrosión metálica consiste básicamente en dos procesos de transferencia de electrones en lugares físicamente diferentes de la estructura metálica (procesos anódicos y catódicos). Por lo que el proceso de corrosión implica: (a) generación y transferencia del catión metálico a la solución, (b) transferencia del oxígeno al cátodo metálico, (c) transferencia electrónica del metal al oxígeno, (d) paso de los electrones del ánodo al cátodo (electro neutralidad metálica) y (e) difusión de los iones Fe^{++} y OH^- en el electrolito (electro neutralidad iónica).

Puede concluirse que la protección tiene que enfocarse en anular o disminuir estos pasos. Pero el agua potable es frecuentemente saturada de oxígeno disuelto y agentes bacteriostáticos y bactericidas como cloro (Cl_2), siendo éste corrosivo. En concordancia con ésto, debemos mencionar que varios factores aceleran el proceso de corrosión, entre ellos la presencia de dióxido de carbono (CO_2), la temperatura, ya que produce un incremento en las velocidades de reacción, y el efecto de la presencia de oxígeno y oxidantes durante el proceso de oxidación; en general, la presencia de estos elementos aumenta la velocidad de la reacción de corrosión.

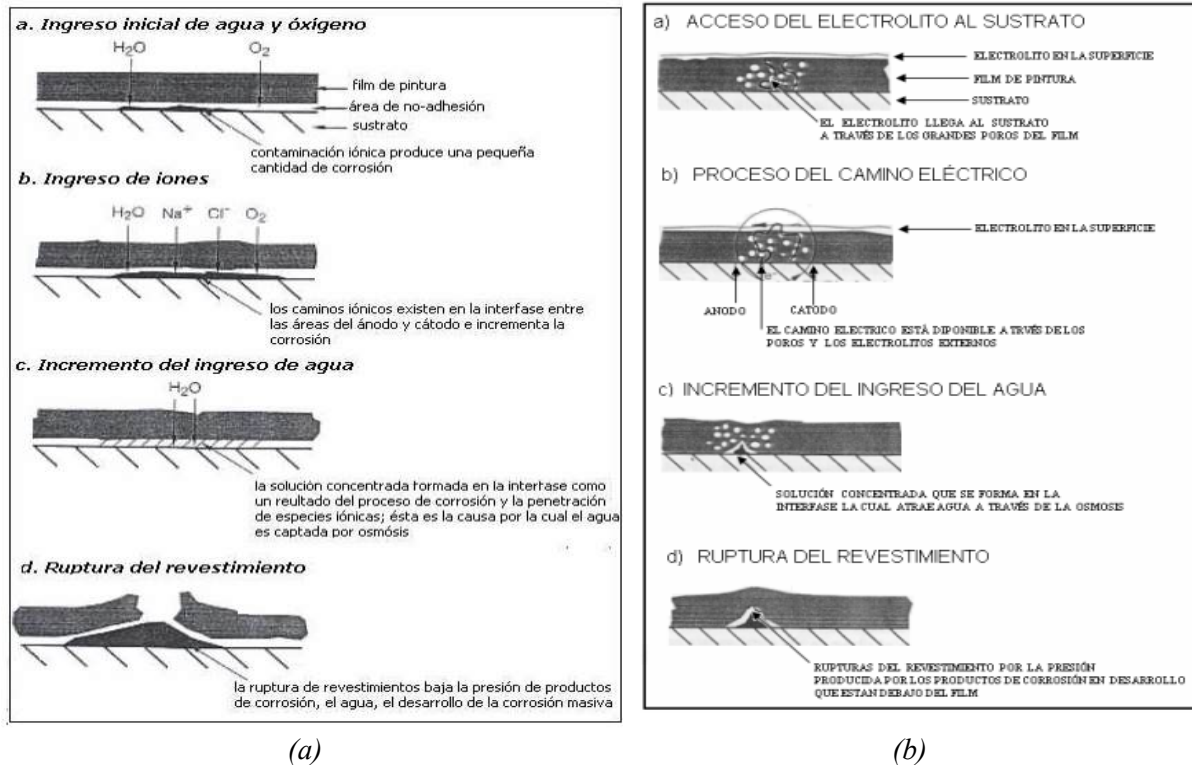


Figura 12: Mecanismo de corrosión en films, extraído de Navarrete Cueva, 2007
 (a) con pérdida de adhesión (b) sin pérdida de adhesión

Corrosión por oxígeno

Este tipo de corrosión ocurre generalmente en superficies expuestas al oxígeno diatómico disuelto en agua o aire; que se ve favorecido por altas temperaturas y presión elevada (calderas). Podemos decir que el oxígeno acelera la corrosión en dos formas, una como un despolarizador, dado que el oxígeno se combina con electrones en el cátodo impidiendo la formación del manto de hidrógeno. Y otra, como un oxidante, dado que la oxidación de los iones ferrosos (Fe^{++}) y férricos (Fe^{+++}) incrementa la tasa de corrosión a un pH por encima de 4.

También, de acuerdo a diferentes autores (Navarrete Cueva, 2007) (Maquinarias Pesadas, 2023) debemos mencionar que las diversas formas de corrosión pueden ser clasificadas por su forma de ataque: (a) uniforme, que es la más benigna de todas, (b) localizada, se realiza en algunas partes, (c) intergranular, se extiende por los bordes de grano y es muy dañina (en cobre, aluminio y acero inoxidable) y (d) por picado, se da en ciertos puntos del metal y suelen formar túneles microscópicos.

Otra forma de clasificación es según el mecanismo y se puede diferenciar entre: (a) galvánica, que resulta de la interacción de dos metales con distintos potenciales de oxidación en un ambiente húmedo o solución corrosiva, (b) bacteriana, que se da generalmente en el suelo y puede ser aeróbica o anaeróbica, (c) por aireación diferencial, que se debe a que la superficie del metal está expuesta a un electrolito que posee aireación variable ya sea por agitación, difusión diferencial, depósitos de impurezas, entre otros, (d) selectiva, que se da cuando en una aleación un metal, (e) por diferencias de temperatura, en donde el ánodo y el cátodo son del mismo metal, pero uno se mantiene a una temperatura mayor que el otro por medios externos, y (f) por celdas de concentración, en donde existen regiones con concentraciones diferentes de electrolitos o sustratos. Además, la heterogeneidad del metal o una impureza cercana a la

superficie del metal es suficiente para iniciar una corrosión electroquímica; a este tipo de corrosión se denomina efecto Evans.

Indicadores de corrosión o incrustación del agua

Trujillo et al., (2008) cita que, en México, para reducir las posibilidades de corrosión en la infraestructura hidráulica, la Comisión Nacional del Agua recomienda que los materiales mantengan una película de Carbonato de Calcio, CaCO_3 ; asimismo, para evaluar la tendencia agresiva del agua, considera el uso de los siguientes índices: de saturación de Langelier, de estabilidad de Ryznar, de corrosión de Riddick, entre otros. De entre ellos, los índices de Langelier y Ryznar son los más utilizados. Estos modelos son considerados como cualitativos. El índice de estabilidad de Ryznar, toma como base los mismos parámetros que Langelier, pero siempre da un valor positivo, el cual provee una idea más clara del nivel corrosivo o incrustante del agua. Además, existen métodos que permiten determinar de manera cuantitativa la agresividad del agua, tal es el caso de Mojmir Mach y Legrand-Poirier, pero debido a su complejidad y difícil aplicación, dichos modelos suelen ser poco utilizados.

Análisis de las causas de corrosión en los equipos estudiados

Según la Fundación Centro Canario del Agua (FCCA) cita que el hecho que un agua sea agresiva potencia su acción corrosiva, aunque para ello deben intervenir diversos factores adicionales. De la misma manera, un agua equilibrada en relación al carbonato de calcio puede ser aún corrosiva con respecto a los metales. Como el equilibrio calco-carbónico se usa para determinar el carácter agresivo o incrustante de un agua, dicho equilibrio nos cuantifica la interacción entre carbonato cálcico (CaCO_3) y el ácido carbónico (CO_2). Por ello nos guiaremos por el índice de Ryznar (RSI), que es más conveniente ya que, aunque se consiga el equilibrio calco-carbónico no se elimina por completo la posibilidad de que esa sea corrosiva.

Recurriendo a datos de análisis de agua, provistos por el departamento de geología de la UNRC, se obtuvieron distintos índices que indican si el agua es incrustante o corrosiva, los cuales se muestran en la Tabla 1: dos análisis, realizados uno con aguas del GES y otro con aguas de la galería filtrante. Estos índices fueron calculados por un software provisto por la página de la Fundación Centro Canario del Agua (FCCA, 2023) y se fijó una temperatura de 60 °C.

Tabla 1: Distintos índices de Incrustación Corrosión del agua calculados a 60 °C.

Índice \ Muestra	GES (1)	GES (2)	Galería Filtrante
Dureza mg CO_3Ca /l	157,88	171,68	65,88
	150 a 300 dura	150 a 300 dura	50 a 150 Moderadamente dura
Alcalinidad	139,45	188,67	116,48
	> que 147,6 muy alta	> que 147,6 muy alta	98,4 a 147,6 alta
Índice de Langelier (LSI)	0,64	1,29	-0,01
	> que 0 tendencia incrustante	> que 0 tendencia incrustante	< que 0 tendencia corrosiva
Índice de saturación de Carbonato de Calcio	0,66	1,3	-0,02
	> que 0 Sobresaturado incrustante	> que 0 Sobresaturado incrustante	< que 0 Insaturado corrosiva
Índice de Ryznar (RSI)	6,42	5,63	7,52
	de 6,0 a 7,0 ligeramente incrustante o corrosivo	de 5,0 a 6,0 ligeramente incrustante.	de 7,5 a 9,0 fuertemente corrosivo.

Si se observan ahora las imágenes de las ampollas en las Fig. 13 a, b y c y 14 a, b y c del CAI pa, se ve que existen muchas ampollas de óxido tanto en el sector del tanque como en sector del colector. En el sector del colector se notan dos particularidades: primero, que existen más ampollas de óxido en la parte media, y segundo, que la oxidación se concentra en la parte posterior del colector y no en la parte anterior

(donde está expuesta al sol). Además, se observa que en algunas ampollas, la corrosión ha perforado la chapa y en otras está en ese proceso; y si se realiza un corte, se pueden observar capas de diferentes compuestos incluyendo la capa de pintura protectora.

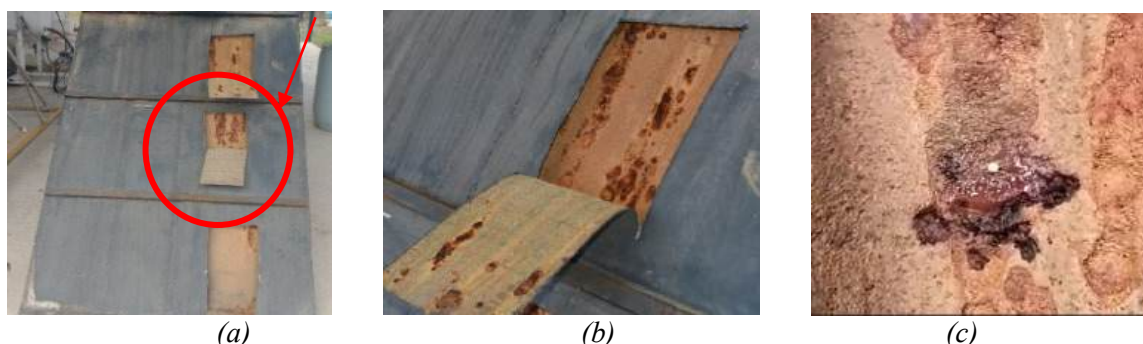


Figura 13 CAI pa (a) (b) Distribución de las ampollas de óxido y (c) perforación por oxidación

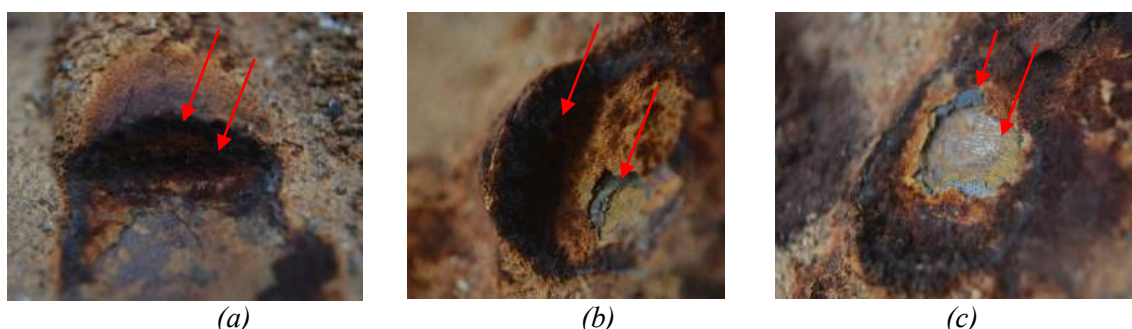


Figura 14 CAI pa en (a) (b) Vista de una ampolla en corte y (c) capa de antióxido y metal base.

Por otra parte, en el CAI oval se observan mucho menos ampollas y sarro, pero las ampollas actuaron de idéntica forma que, en el otro colector. En este caso (Fig. 15 a, b y c) primero fue raspada la superficie que da al exterior, descubriendo una perforación; luego, al cortar la chapa, se observó la perforación y además se vio que en el interior del colector oval, se desprendió una ampolla, que luego fue fotografiada (Fig. 16 a, b y c), observándose muchas capas de compuestos distintos.

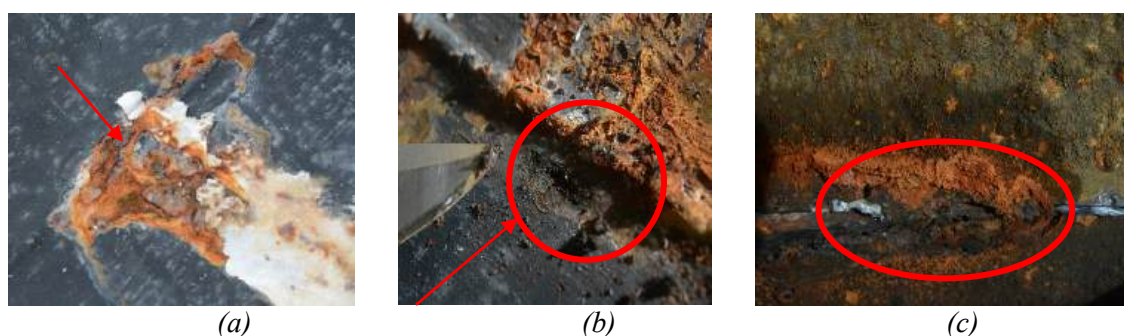


Figura 15 CAI oval (a) Mancha de óxido, (b) Perforación desde el exterior y (c) parte del interior

Possible mecanismo de oxidación

En un trabajo de Rosado (2023) se explica un mecanismo de corrosión localizada, que es posible que exista en los casi. Brevemente, este mecanismo se inicia luego que el agua y los electrolitos se difundieron a través de la capa de pintura y comienza la corrosión; a continuación, los productos de corrosión (generalmente óxidos hidratados) al ser poco solubles, precipitarán dejando al electrolito en condiciones de recibir más cationes. Estos óxidos podrán precipitar sobre el metal y el primer producto formado por la corrosión en el ánodo es el hidróxido ferroso, relativamente soluble, pero si hay provisión de oxígeno los óxidos ferrosos pasarán a férrico mucho menos soluble, creando un medio ácido favorable a la disolución del metal.

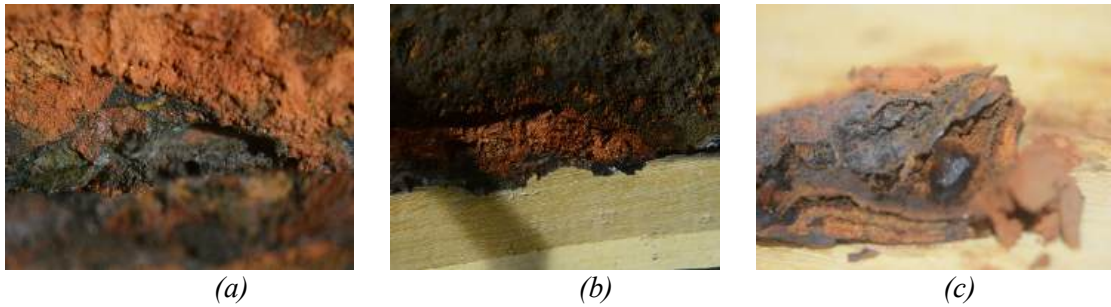


Figura 16 (a) (b) y (c) Corte de ampollas de óxido en el CAI oval, mostrando diferentes compuestos.

Estos óxidos insolubles crearán una cubierta permeable en donde los iones ferrosos migrarán a través de ella, encontrando condiciones oxigenadas y produciendo más hidróxido férrico. Se formará un microscópico pozo debajo de la ampolla, donde el electrolito será ácido, el proceso se hará continuo y a la larga perforará el metal (picadura), debemos recordar que el volumen del hidróxido férrico formado puede llegar a ser veinte (20) veces de mayor tamaño que el metal original (Fig. 17 a y b). La presencia de algunas sales en el agua, favorece el proceso corrosivo, especialmente en el caso del cloruro, por la gran afinidad que este anión tiene por el hierro con el que forma cloruros y oxiclорuros.

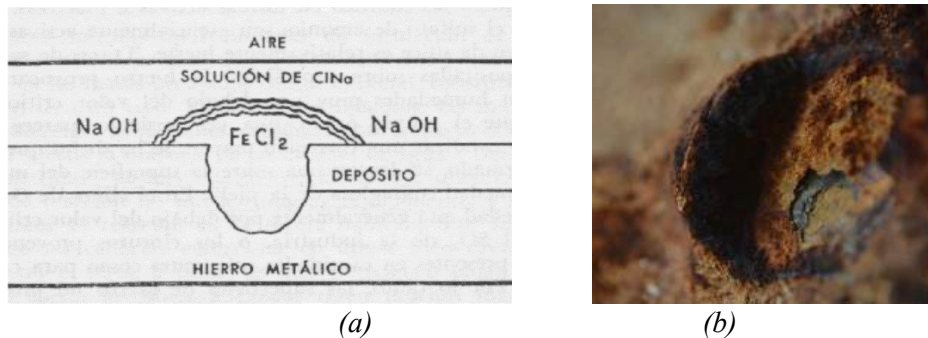


Figura 17 (a) Esquema de la corrosión localizada, extraída de Rosado, 2003
(b) Ampolla formada en los CAIs

Protección catódica

En la bibliografía (Maquinarias Pesadas, 2023) (Rosado, 2023) se explica que un ánodo de sacrificio es el componente principal de un sistema de protección catódica galvánica que se utiliza para proteger contra la corrosión las estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Los ánodos de sacrificio están hechos de una aleación metálica con mayor tendencia a la oxidación que el metal de la estructura a proteger, dicha aleación metálica tiene un potencial de reducción menor. La diferencia de potencial entre los dos metales implica que el ánodo galvánico se corroe preservando la estructura a conservar.

Para que esto funcione debe haber un flujo de electrones entre el ánodo y el metal a ser protegido (contacto directo) y una vía de iones tanto entre el agente oxidante (agua) y el ánodo, como entre el agente oxidante y el metal a proteger, formando así un circuito cerrado. Existen tres metales principales utilizados como ánodos: magnesio, aluminio y zinc. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas. El magnesio es el que tiene el potencial eléctrico menor de entre los tres metales y es el más adecuado para las áreas donde la resistividad del electrolito (suelo o el agua) es mayor.

CONCLUSIONES

- a- El sistema de ánodo de sacrificio funcionó y se debe revisar cada dos años para asegurar que la protección catódica sea efectiva, ya que cuando se acaba dicha protección empieza la serie de reacciones de corrosión.
- b- La capa de antióxido colocada en el interior del CAI oval fue más efectiva que en el CAI pa. Esto es debido probablemente al proceso de pintado que, aunque fue el mismo, la geometría del

- equipo favorecía el impregnado de la superficie interior en el CAI oval. En el CAI pa quedaron superficies convexas que dificultan la adhesión de una capa de pintura en el interior.
- c- El agua potable proveniente de las galerías filtrantes posee un índice de Ryznar (RSI) de 7,52 que indica que es fuertemente corrosiva y además a esto debemos sumarle que al ser agua de red posee un tratamiento por parte del Ente Municipal de Obras Sanitarias de Río Cuarto (EMOS) que asegura un cloro residual de entre 0,3 y 0,6 g/l, favoreciendo las reacciones de oxidación. En cambio, en el agua del pozo de la UNRC, que dio un índice de Ryznar (RSI) de 6,025 en promedio, indica que es ligeramente incrustante o corrosiva, lo que se comprueba por el mayor periodo de tiempo de funcionamiento.
 - d- Se observó en los dos CAIs que el mecanismo de corrosión probablemente se debió a un pasaje de agua a través de la capa de pintura (por falta de adherencia u ósmosis) y luego un mecanismo de oxidación por picadura, ya que se realizaron perforaciones debajo de ampollas de óxidos. Esto se observó mayormente en el CAI pa, por lo comentado en el punto anterior, además, puede haber una situación de oxigenación diferenciada (probablemente debido a precipitaciones de carbonato de calcio) y por existir superficies (anterior y posterior del colector) a diferentes temperaturas, esto se evidencia en las paredes, en donde una está muy corroída (ánodo) y la otra en donde la corrosión es casi nula (cátodo).
 - e- En el CAI pa, al poseer una resistencia eléctrica, cuando está se encuentra en funcionamiento, puede haber competencia de ánodo de sacrificio ya que el equipo puede actuar como ánodo si se dan las condiciones propicias.
 - f- Una posible solución para poder realizar el cambio del ánodo de sacrificio cuando sea necesario (un usuario en general no controla el tiempo de uso del mismo) sería colocar una cascada de ánodos de sacrificio a fin de que cuando se termine el primer ánodo (el de menor potencial) continúe el próximo y este active un mecanismo indicador para obligar al cambio de dichos ánodos.
 - g- El sistema de alimentación de agua fría en el colector CAI pa debería cambiarse ya que, al ingresar al equipo a través del tanque, y este contener agua caliente, causa la precipitación de sales en el conducto de ingreso aumentando así la pérdida de carga.
 - h- En el CAI oval se debe proveer un sistema de expulsión de agua en la parte inferior, a fin de que si existe presencia de agua no se deterioren los sistemas de anclaje que están compuestos por madera y tornillos de acero.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Ha sido subsidiado por la Secretaría de Ciencia de la UNRC y Técnica y la Facultad de Ingeniería de la UNRC. También se agradece al departamento de Geología (UNRC) por brindar datos de análisis y distribución de agua en la ciudad de Río Cuarto.

REFERENCIAS

- Barral J., Galimberti P., Lema A., Adaro J. y Fasulo A. (2002) Design, construction and simulation Analysis of a low-cost Tubular Integral Collector Storage System. Proceedings de Euro Sun 2002 - The 4th ISES - Europe Solar Congress. Bologna, Italia.
- Duffie J. A.; Beckman W. A.; Blair N. (2020) Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind, fifth edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- Fasulo A., Follari J., Barral J. Comparison between a simple solar collector accumulator and a conventional accumulator. Solar Energy, Vol. 71/6, pp. 389-401, 2001.
- FCCA [En línea] Fundación Centro Canario del Agua - Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias, Dirección URL: <<https://fccca.es/productos-y-publicaciones/software-online/>> [consulta: 05 de agosto de 2023].
- Garnica J.H, Lucchini J.M., Barral J.R., Buosi P.D., Galimberti P.D. (2019) Ensayo Térmico Normalizado de un Colector Solar con Acumulación Integrada Parcialmente Aislado, Hecho con Materiales Accesibles y de Fabricación Simple. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 23, pág. 02.25 – 02.36.

- Garnica J.H., Lucchini J.M., Barral J.R., (2017). Colector solar con acumulación integrada de perfil oval, análisis teórico-experimental de su performance y estudio comparativo. Actas del COCIM 2017, XVII Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile, 2017, pp. 166-170.
- Garnica J.H., Barral J.R., Lucchini J.M., Stoll R. G., (2011). Diseño Optimizado de un Colector Acumulador de Recipiente No Cilíndrico Usando Métodos de Elementos Finitos. Avances en Energía Solar y Medio Ambiente. Vol. 15, pág. 03-51 - 03-59
- Maquinarias Pesadas [En línea] Manual de Corrosión de Metales – Tipos, Resistencia, Causas y Protección Catódica. Dirección URL: <<https://www.maquinariaspesadas.org/blog/2205-manual-corrosion-metales-tipos-resistencia-causas-proteccion-catodica>> [consulta: 05 de agosto de 2023]
- Mata Bravo S. J., Tesis (Grado), (2011) Cálculo de la Velocidad de Corrosión en un Acero al Carbono Empleando el Líquido Extraído de la Cáscara de la Nuez del Merey (LCM) como Inhibidor en Presencia De CO₂. Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui - Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas - Departamento de Ingeniería Química – Venezuela.
- Navarrete Cueva E.F. [En línea] Tesis (Grado), (2007) -, Corrosión y Degradación de los Metales. Escuela Politécnica - Quito Ecuador. Dirección URL: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2771/1/CD-0553.pdf>> [consulta: 05 de agosto de 2023]
- Rosado R. [En línea]- Corrosión del Acero en el Concreto. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - FCEIA - UNR - Rosario – Santa Fe. Dirección URL: <<https://www.fceia.unr.edu.ar/materialescivil/Publicaciones/C.pdf>>, [consulta: 05 de agosto de 2023].
- Stoll R. G., Garnica J. H., Barral J. R. y Fasulo A. J. (2007) Estudio del comportamiento de colectores con acumulación integrada de dos tanques con y sin descarga de agua caliente. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, pp. 3-53:3-60.
- Trujillo E., Martínez V., Flores N. S., (2008) Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono, Información Tecnológica Vol. - 19 N°6 – 2008. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Toluca, México.

CORROSION PROBLEMS ANALYSIS FOR TWO INTEGRAL COLLECTOR STORAGE SYSTEMS BUILT WITH SIMILAR RAW MATERIALS AND PROCESSES

ABSTRACT: This article analyzes oxidation problems that occurred in two units to heat water by means of solar energy, which are prototypes of integral collector storage systems. These units are geometrically different but they have been built with similar raw materials and using similar processes. The study is concentrated on the absorber-storage component, for which black steel sheet was used as the main raw material. The two systems worked well from the thermal point of view, but they presented pitting corrosion after a certain number of years. The difference between the time intervals of the two units motivated the present study, taking into account that the time interval was fairly short in one case. Looking for reasons that cause these problems, the systems were disassembled from their routine applications, and their absorber-storage components were cut down and opened in critical sectors. Different kinds of water fed to each system; then, their contents were analyzed, considering characteristic indexes to observe if the water presented corrosive or fouling qualities. Possible corrosion mechanisms were also analyzed, and protective means such as antirust paints and sacrificed anode were suggested. Finally, conclusions are presented about the possible causes of corrosion and preventive measures are proposed.

Keywords: solar collector, integrated storage, hardness of water, corrosion.

NORMA PARA CARACTERIZAR TÉRMICAMENTE A LOS SISTEMAS COMPACTOS SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AGUA RESIDENCIAL EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

Jorge R. Barral¹, Anahí Lanson², Federico Nores Pondal³, Alejandro Chiaravalotti⁴, Pablo Bertinat⁵, Joaquín Garat⁶

¹Grupo de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto

²Grupo de Estudios de la Radiación Solar, Universidad Nacional de Luján

³Laboratorio de Estudios Sobre Energía Solar, Univ. Tecnológica Nacional Regional Buenos Aires

⁴Laboratorio de Energía Solar Térmica, SOEYM, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)

⁵Observatorio de Energía y Sustentabilidad, Universidad Tecnológica Nacional Regional Rosario

⁶Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), Comisión de Energía Solar Térmica.

Tel. 0358-4758842 – Fax 0358-4676246 e-mail: jbarral@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Este artículo describe el estudio realizado para la elaboración de una normativa que caracterice térmicamente los sistemas compactos de calentamiento de agua mediante energía solar residenciales en la República Argentina. La motivación para este trabajo la origina el hecho de instalación de equipos sin un conocimiento cabal de las prestaciones que estos dan para distintas condiciones climáticas y de descarga. Se propone la utilización de una Norma IRAM, basada en estándares internacionales, que permite ensayar un sistema compacto, dando como resultado una ecuación que estima la producción diaria de energía que proporcionaría una descarga completa del equipo. Se explican las tecnologías a las cuales aplica la norma y se comentan las mediciones que deben hacerse. Se remite este estudio a una norma existente en la Unión Europea, que toma por defecto la evaluación en cuatro ciudades de distintas regiones geográficas. Se hace un análisis comparativo en base a las latitudes de distintas ciudades de la República Argentina. Como ejemplo, se realizan estimaciones de predicción anual de un mismo equipo para dos ciudades distintas, observándose diferencias notables en fracción solar obtenida. Se proponen finalmente una serie de aspectos a trabajar para lograr un mejor aprovechamiento de la energía solar térmica residencial.

Palabras clave: calentadores solares compactos, producción de energía, clima, ensayos, normas.

INTRODUCCIÓN

En la República Argentina, el consumo de agua caliente sanitaria (ACS) es estadísticamente el segundo consumo energético de una vivienda, solo superada por la climatización (Gil, 2021). Hoy, mayoritariamente la energía que produce el calentamiento proviene de gas natural, gas envasado, electricidad, leña y carbón (Queipo y Pasetti, 2022), y sería sumamente importante poder reemplazar estas formas de energía por una energía limpia y renovable como la energía solar. Este reemplazo brindaría beneficio económico a los usuarios, como así también mitigaría efectos de gases de efecto invernadero. Se sumarían, además, la ventaja de la gratuidad del recurso energético y el hecho de que es una energía localizada, por lo cual no demanda tendido de largas redes de distribución.

El calentamiento de agua mediante energía solar es una de las aplicaciones más difundidas en el mundo y dentro de estas aplicaciones, el uso con fines residenciales de ACS es una de las más prometedoras (Weiss y Spörk-Dür, 2023). Para grandes edificaciones, probablemente el uso de sistemas forzados con muchos colectores y pocos tanques de almacenamiento puede ser una solución adecuada, pero para la provisión de ACS unifamiliar la utilización de sistemas compactos es más conveniente.

Consecuentemente, los calefones solares compactos son de uso absolutamente mayoritario en nuestro país. En los sistemas compactos, la superficie absorbadora de radiación solar y el almacenamiento se acoplan en una única unidad de geometría y tamaño predeterminado, no requieren bomba de circulación y son de simple y rápida instalación.

Estos equipos entran técnicamente dentro de los denominados energía solar térmica de baja temperatura, presentando, en pocos casos, algún nivel de baja concentración. Las tecnologías disponibles hoy en el país se basan en sistemas de tubos evacuados (son mayoría), equipos con colectores de placa plana y colectores con acumulación integrada (una minoría, de un único fabricante). Todos funcionan termosifónicamente, lo cual implica que el movimiento de calentamiento del fluido caloportador se realiza mediante convección natural. Funcionan conectados directamente al tanque de almacenamiento general de la vivienda o a la red de suministro, y alimentan el servicio de agua caliente de la casa por gravedad. Una buena referencia de fabricantes e importadores de estos equipos se encuentra en el Censo Nacional Solar Térmico realizado por el INTI (Sabre et al., 2020).

Para la aplicación de un equipo compacto a una necesidad determinada, hace falta como primera medida conocer la demanda energética. Lo habitual es realizar una estimación a partir del número de personas que harán uso del servicio, vinculando esto al tamaño del tanque de almacenamiento del equipo. En nuestro país se usa el criterio de 50 litros por persona por día. También se prevé un sistema de apoyo de energía convencional para compensar el impacto de una secuencia de varios días nublados corridos.

Es claro que esta estimación tiene una variabilidad importante, pudiendo resultar absolutamente innecesario el apoyo de energía convencional durante gran parte del verano en el centro y norte del país. O por otro lado, ante una secuencia de varios días nublados y fríos tener un porcentaje alto de uso de energía convencional. Es normal ver en las propagandas de venta de nuestro país que los equipos pueden “garantizar un 80 % de ahorro de energía”. ¿De dónde proviene tal aseveración? Aparentemente, solo se basa en la experiencia de fabricantes e instaladores, o proyecciones deducidas de resultados en otros países. Además, un potencial usuario puede presumir, sin un razonamiento técnico profundo, que un mismo equipo, ante una misma demanda de litros, no va a entregar la misma energía si se encuentra situado en Bahía Blanca o en la ciudad de La Rioja. La necesidad de ser asertivos es muy importante, ya que no es conveniente pagar por una instalación de un equipo chico que luego no satisfaga un buen porcentaje de consumo y es un gasto innecesario instalar un equipo muy grande para un consumo muy pequeño.

Si bien desde los años 70 hay fabricantes locales que comercializan sistemas de calentamiento de agua mediante energía solar, su uso se ha intensificado en los últimos 15 años, mayormente por la importación de equipos baratos de China y, últimamente, por el aumento de los combustibles fósiles y tarifas de energía. En 2009 el INTI inauguró su plataforma solar térmica, cuando comenzó a trabajar con los fabricantes locales, desde hace unos 10 años IRAM retomó el tratamiento de normativas sobre energía solar térmica y en 2017 se creó la Cámara de Fabricantes de Equipos de Energía Solar Térmica (CAFEEST). También, desde hace varios años, algunos laboratorios universitarios han estado trabajando en la medición del comportamiento térmico de colectores y sistemas compactos. Sin embargo, de los equipos compactos que se comercializan hoy en el país, ninguno, ni de fabricantes locales ni importados, ha cumplido con un ensayo que pueda indicar cual es la cantidad de energía anual que pueda cubrir para un determinado clima y demanda de usuario.

La mayoría de los países de Europa resolvieron un problema similar en el año 2000, mediante la puesta en marcha de la norma EN 12976-2 (2000), mediante la cual evalúan el comportamiento térmico de equipos para distintos climas de referencia de Europa y distintas demandas. Esta norma se basa en un ensayo que al menos tres laboratorios de Argentina están en condiciones de realizar, por lo cual sería muy conveniente poder establecer una normativa similar al respecto. La existencia de una norma trae ventajas tanto para los fabricantes como para los usuarios. En particular, la EN 12976-2, dedicada a la caracterización térmica de los equipos es de interpretación muy sencilla para los instaladores y para los propios usuarios. Atendiendo a la necesidad que surge de lo comentado en el párrafo anterior, en el Comité de Energía Solar Térmica de IRAM se ha comenzado a trabajar en una norma que contemple la realización de una caracterización térmica de los equipos compactos para la República Argentina.

La motivación para redactar este artículo es mostrar la necesidad descripta y poner en común este tema en la comunidad científica y en todos aquellos que se sientan protagonistas y consideren que pueden aportar a la discusión. Este artículo hace primeramente una presentación del funcionamiento básico de los sistemas compactos, con comentarios acerca de cómo influyen sus tecnologías. Seguidamente, se analiza el estado actual en el país respecto a las instalaciones que se están realizando. Se pasa luego a una explicación sobre la necesidad de una información sobre la producción de energía y el concepto de fracción solar, explicándose también brevemente la norma a utilizar para determinar la producción anual de un equipo. Se presenta finalmente el análisis de un mismo equipo para dos climas diferentes de la República Argentina, donde queda en evidencia la influencia del clima en la producción energética.

AGUA CALIENTE RESIDENCIAL Y LOS SISTEMAS COMPACTOS

En la Figura 1 se muestra el esquema de funcionamiento termosifónico de un sistema compacto básico residencial. En general el equipo es alimentado por el tanque de almacenamiento de la vivienda (entrada de agua fría), o si viene de la red directamente o de un tanque muy alto, suelen contar con un tanque de prellenado. Los sistemas pueden ser atmosféricos o presurizados. En el segundo caso suelen poseer un intercambiador de calor que soporte la alta presión, ya que un tanque de almacenamiento de alta presión encarece mucho el sistema.

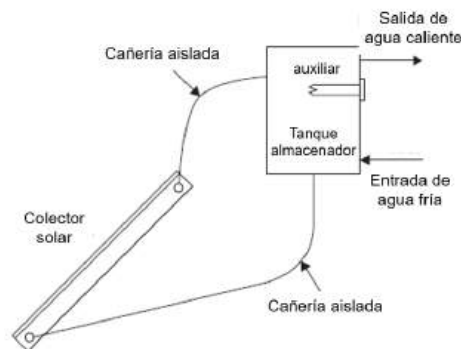


Figura 1: Esquema de conexión de un sistema de agua caliente solar compacto

Este esquema básico suele contar con el agregado de una válvula mezcladora para evitar que el agua llegue a muy alta temperatura al usuario, y eventualmente también una válvula de alivio por sobretensión y sobrepresión, para evitar que alguno de esos efectos dañe al equipo.

Una explicación más detallada de cada una de las tecnologías se puede hallar en Placco et al. (2010). En general se utilizan en Argentina sistemas de tubos evacuados inundados y de placa plana. En el caso de los de placa plana, hay varios modelos con intercambiador de calor que usan como fluido caloportador una mezcla de agua con glicol que no estará en contacto con el usuario. Los sistemas de tubos evacuados con tubo de calor han sido importados en menor medida; no son aconsejables en climas templados y templado-cálidos, ya que pueden alcanzar demasiada temperatura y son de costo bastante más elevado que los de tubos inundados. Los sistemas con acumulación integrada son explicados por Tügel y Sogari (2019) y aún de uso muy limitado en el país. No se incluyen en este análisis los sistemas activos ni los calentadores de piscinas.

Si bien un cálculo más preciso debería comenzar por la demanda de agua caliente, en estos casos sencillos se hace una estimación por cantidad de personas que habitan el lugar de la instalación. Se estima para Argentina un valor de 50 litros por persona por día. Teniendo en cuenta que la temperatura de baño está alrededor de los 42 °C (más o menos, dependiendo de la persona), es muy probable que días soleados de verano se tenga agua caliente en exceso y deba mezclarse con la fría, mientras que en días invernales o varios días corridos nublados deba necesitarse un apoyo de energía convencional. En este último caso se suelen utilizar calentadores en serie a la salida o hay equipos que incluyen en la parte superior del almacenamiento una resistencia eléctrica como elemento calefactor

EL ESTADO ACTUAL DE LAS INSTALACIONES QUE SE REALIZAN

Tal lo reflejado por el Censo Nacional Solar Térmico del INTI (Sabre et al., 2020), la mayoría de las instalaciones residenciales son realizadas con sistemas de tubos evacuados compactos, con una altísima incidencia de equipos importados. A 2019 se estima un 22 % de sistemas instalados de origen nacional. Estas instalaciones se dan mayormente en sectores poblacionales que están en las periferias de las ciudades y no tienen acceso a gas natural, y en pueblos y ciudades enteras a las cuales aún no ha llegado el gas natural. Obviamente, también en pobladores aislados en campos y sectores montañosos. Si bien hay intenciones de ir sincerando las tarifas energéticas, el fuerte subsidio que aún persiste, sigue operando en contra de la difusión de esta opción energética.

Ha habido varios emprendimientos nacionales y provinciales para favorecer el desarrollo de estas tecnologías, su difusión e instalación, con éxito variados, atendiendo a las problemáticas económicas propias del país. Como se mencionara anteriormente, operaron positivamente el INTI desde 2009, y la Secretaría de Comercio Interior que impulsó la creación de la Cámara de Fabricantes de Equipos de Energía Solar Térmica (CAFEEST). Desde 2014 el INTI inició su trabajo para la Certificación de Instaladores Nivel II (INTI, 2023), que a la fecha ha tenido relativo éxito, ya que solo operó en Buenos Aires, no fue replicado en otras provincias y hay hoy muy pocos instaladores certificados, siendo la mayoría de los instaladores gasistas, plomeros u idóneos sin formación profesional. Está haciendo falta una ley solar térmica nacional para ordenar todo el sistema. Un proyecto fue ya presentando tres veces y todas las veces perdió estado parlamentario por no tratamiento en las cámaras.

Secretaría de Comercio emitió dos resoluciones: (a) la 520 en 2018, Reglamento Técnico que establecía los requisitos técnicos de calidad y seguridad que deben cumplir los colectores solares y sistemas solares compactos, que se comercializaran en el territorio de la REPÚBLICA ARGENTINA, determinando los ensayos a realizar a los equipos y un cronograma de cumplimiento de etapas que no se pudo cumplir, y (b) la 753 en 2020, que mejora la anterior, prevé el cumplimiento de gran parte de normas IRAM, y aunque en particular prevé el cumplimiento de la IRAM 210015-1, que incluye el ensayo que tratamos en este trabajo, queda en abstracto su aplicación, al no establecerse en qué lugares y cómo se harán las predicciones de rendimiento anual, y esa parte al menos, no se está aplicando.

En el año 2021, en el marco del Ministerio de Desarrollo Productivo se diseñó y puso en marcha el Programa de Desarrollo de la Industria Solar Térmica (PRODIST). Los objetivos del mismo se asociaron a la idea de promover y fortalecer el desarrollo de un sector productivo nacional vinculado a la energía solar térmica, incrementar en cantidad y calidad la fabricación local de equipos, promover su incorporación en los hogares, producir ahorros energéticos y económicos para las familias y para el estado y producir ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero entre otros. El PRODIST avanzó mediante un convenio con el Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat a través del cual se planteó la posibilidad de implementar en el marco del Programa Casa Propia la incorporación de calefones solares en las nuevas viviendas (Arraña et al., 2022).

Este proceso permitió trabajar en la capacitación y apoyo al personal de los diferentes Institutos de Vivienda de las diversas provincias que ayudó a establecer pautas para la incorporación de sistemas solares térmicos. Se trabaja en apoyo a los IPV en lo relativo a confección de pliegos, especificaciones técnicas, pautas para las instalaciones etc. Por otro lado, se trabajó en el apoyo a los fabricantes nacionales mediante líneas de crédito y apoyo técnico desde INTI para mejorar e incrementar la producción. A dos años de iniciado este proceso, más allá de las dificultades que se presentan se ha logrado multiplicar por 4 en dos años la cantidad de equipos nacionales comercializados. Aunque incompleto y aún en proceso de desarrollo, el PRODIST podría tener la capacidad de traccionar el crecimiento del mercado solar térmico con fabricación de equipos en el país.

LA NECESIDAD DE CARACTERIZAR TÉRMICAMENTE LOS EQUIPOS COMPACTOS

Aunque los sistemas termosifónicos son de las aplicaciones más antiguas que hay, su funcionamiento hidráulico que depende de la intensidad de la radiación solar, hace que su comportamiento sea de permanente estado transitorio y durante años la medición y predicción de funcionamiento fue altamente

incierto, basándose los diseños y aplicaciones en la experiencia de cada fabricante. Después de un arduo trabajo de varios años de comisiones internacionales, los esfuerzos cristalizan en el año 1995 a través de la ISO, con las primeras normas que permitieron caracterizar a los sistemas por su producción anual de energía (Carvalho y Naron, 2000). Una de esas normas ha sido procesada y adaptada por IRAM para generar la IRAM 210004, que determina los ensayos a hacer para obtener una caracterización del comportamiento térmico del equipo en estudio y estimar la provisión de agua caliente que es capaz de dar dicho equipo en un año en un determinado clima.

Si bien los equipos importados dicen que cumplen varias de normas (generalmente de China, Europa y USA), no proveen un certificado de su caracterización térmica, y no lo podrían hacer porque no han utilizado las condiciones climáticas de Argentina. Traen en general un buen manual de armado, pero no certificados de mediciones y resultados. Asimismo, los fabricantes locales tampoco han realizado los ensayos térmicos de sus equipos, por lo cual, lo que se mencionó anteriormente, el decir que un equipo determinado cubre un 80 % de la demanda, puede obedecer a una suposición basada en datos de otros países o la eventual experiencia del fabricante, pero no a una certificación de un organismo autorizado para tal fin.

Muchos usuarios e incluso instaladores y profesionales demandan un etiquetado de los equipos del tipo de los que se usan para eficiencia de consumo, con letras y colores. Eso es muy dificultoso en este caso, ya que estos equipos no consumen energía, la producen, y encima dependen del clima. De hacerse algo así, implicaría etiquetas variables para un mismo equipo dependiendo de dónde se le instale. Lo más sensato es poder decir cuánta energía anual va poder entregar un equipo instalado en cierto lugar y para determinada cantidad de usuarios.

Como estos equipos son bienes de un valor relativamente alto, a lo cual se le suma el costo de la instalación, el asesoramiento que del vendedor o instalador debe ser lo más certero posible para no subdimensionar, sobredimensionar o instalar un calefón de calidad inadecuada para la prestación que debería dar. Como ejemplo, sería absolutamente inapropiado, colocar un equipo muy caro, tipo tubo de calor (*heat pipe*) en La Rioja o Jujuy, donde estaría probablemente varios días hirviendo, cuando la necesidad de una familia se podría atender con un equipo mucho más modesto. Caso contrario, no se puede pretender ir con un equipo para climas templados a Chubut o Santa Cruz, donde la cobertura energética solar sería absolutamente baja, justificándose allí un equipo de tubos de calor. Debe tenerse en cuenta, además, que gran parte de la población que requiere estos servicios, es de condición socio económica comprometida, por lo cual el costo del equipo es una variable central.

La función de la norma faltante sería poder estimar en forma confiable el porcentaje de energía de demanda que va a poder cubrirse con energía solar. A esto se le denomina "Fracción Solar". Y dicha demanda, obviamente está vinculada al clima, a menor radiación, menos fracción solar, si la temperatura del agua a calentar es baja, menos fracción solar. Para ello, la norma debe ser comprensible no solo para los profesionales, sino también para los vendedores de equipos, instaladores y los propios usuarios.

NORMA IRAM 210004 - AVANCES DE LABORATORIOS EN ARGENTINA

La aplicación de esta norma se basa en un método estadístico para determinar una ecuación que permite calcular la energía que es capaz de coleccionar el sistema para cada valor diario medio mensual de radiación solar y temperatura en las horas de sol. Se obtienen así 12 valores de energía total coleccionada, una por cada mes del año. Por otro lado, se determinan las pérdidas nocturnas. Luego, establecida la demanda, se puede estimar que porcentaje de esa demanda será provisto solarmente.

El ensayo en sí consta de al menos 6 días enteros de medición, en los cuales se carga el sistema (colector más almacenamiento) a temperatura de red, T_{red} , a las 6:00 hs solar y se le descarga a las 18:00 hs solar, extrayéndole al sistema tres volúmenes de su almacenamiento completos, mientras se reemplaza el agua del sistema a la misma T_{red} con que fue cargado. Esa curva de descarga de las 18 hs. se muestra en la Figura 2. En absisas se muestran los volúmenes de descarga y en ordenadas la temperatura de descarga, T_d . Toda la parte sombreada de la figura, con la correspondiente conversión de unidades, es una representación de la energía recolectada por el sistema en el transcurso de las 12 horas en que estuvo

funcionando. Durante esas 12 horas se deben medir las variables climáticas para poder integrar toda la energía recibida en forma de radiación solar, como así también los valores de temperatura durante el día. Esta medición se realiza en 6 días distintos con ciertos niveles de radiación solar y temperaturas de entrada de red, para generar un muestreo estadísticamente confiable, con el que se desarrolla la ecuación (1) que representa el comportamiento del equipo para recolectar energía durante un día cualquiera

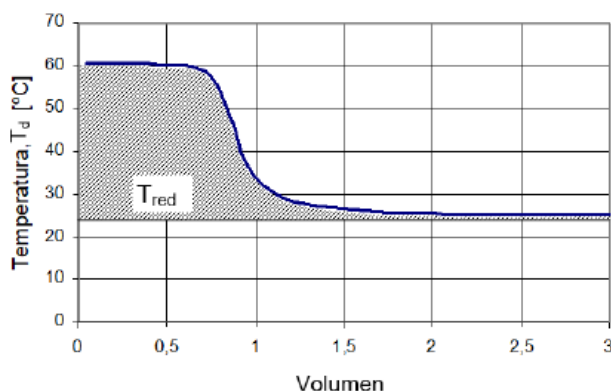


Figura 2: Curva de descarga de sistema compacto de acuerdo a la IRAM 210004

$$Q = a_1 H + a_2 (T_{a(día)} - T_{red}) + a_3 \quad (1)$$

H = radiación total recibida durante el día en el plano del colector del sistema compacto [MJ/m^2]

$T_{a(día)}$ = temperatura ambiente promedio durante el calentamiento [$^{\circ}\text{C}$]

a_1 , a_2 , y a_3 son constantes que resultan de un estudio estadístico de los resultados de las mediciones.

Cualquiera sea el lugar en que se realice el ensayo y la época del año, la ecuación (1) va a arrojar los mismos valores de los coeficientes, por lo cual dicha ecuación es única para ese equipo y no hace falta repetir los ensayos para realizar predicciones de energía en cualquier ciudad.

Se realiza también un test para medir mixing (mezclado) y una noche de enfriamiento para determinar el coeficiente de pérdidas térmicas U_s

$$U_s = \frac{4180 \cdot V_s}{\Delta t} \cdot \ln \left(\frac{t_i - t_{a,s(av)}}{t_f - t_{a,s(av)}} \right) \quad (2)$$

U_s = coeficiente de pérdidas del almacenador [$\text{W}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$]

V_s = Volumen del almacenamiento

t_i = temperatura inicial del agua al iniciar la medición

t_f = temperatura final del agua al terminar la medición

$t_{a,s(av)}$ = temperatura promedio del aire externo al almacenamiento durante el proceso de medida

Δt = tiempo transcurrido desde el inicio a la finalización de la medición.

Con la ecuación (1) prediciendo el balance de energía diario y la (2) estimando las pérdidas, se realiza un proceso día por día durante un año típico meteorológico del lugar y se puede predecir la energía anual que entregará el equipo.

Laboratorios en condiciones de realizar el ensayo según norma IRAM 210004

Hay actualmente tres lugares en Argentina donde se han llevado adelante los ensayos previstos en la IRAM 210004. Estos son el INTI en su Parque Tecnológico Miguelete, el Laboratorio de Estudios Sobre Energía Solar (LESES), Universidad Tecnológica Nacional Regional Buenos Aires, y el Grupo de Energía Solar (GES) de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

El Área de Energía Solar Térmica de INTI, comenzó en el año 2010 con el lanzamiento de la Plataforma Solar (Ver Figura 3) donde se brindó apoyo a los productores nacionales de sistemas solares térmicos compactos en las diversas especialidades que se trabajaban en el INTI, desde cuestiones intrínsecas a la tecnología, hasta el embalado, transporte y otras dificultades que atravesaban las empresas para su desarrollo. Posteriormente, la plataforma se convirtió en un espacio de difusión de la tecnología y se constituyó el Laboratorio Solar Térmico del INTI donde actualmente se realizan los ensayos para cumplimentar la resolución vigente, obligatoria para la comercialización de estos equipos. Actualmente, se está llevando adelante obras para la instalación de nuevos dispositivos, ya adquiridos, que permitirán la realización de todos los ensayos de las normas IRAM 210015-1, IRAM 210022-1 así como también los estándares ISO 9806 e ISO 9459-2 y 5. También se impulsó el desarrollo de la certificación de instaladores de sistemas solares térmicos, bajo la norma ISO 17024, en conjunto con fabricantes, importadores, distribuidores, educadores e instaladores de la tecnología. También realiza de manera bienal desde el año 2015 un relevamiento del sector solar térmico argentino, llamado “Censo Solar Térmico” (Sabre et al., 2020), en el cual, a través de una carga virtual voluntaria se recaba información sobre todos los actores del mercado, para obtener información estadística que permita conocer y difundir la información recopilada. Esta publicación es tomada y analizada para una gran diversidad de fines, desde emprendedores, estudiantes hasta decisores políticos para generar nuevos proyectos, de los cuales en algunos participamos como es el PRODIST para el desarrollo de la industria solar térmica nacional. También es tomada por publicaciones internacionales como Solar Heat World Wide (Weiss y Spörk-Dür, 2023) permitiéndole a la Argentina ser parte de estos prestigiosos informes del mercado solar térmico global.



Figura 3: Plataforma Solar Térmica de INTI y sala de mediciones.

El Laboratorio de estudios sobre energía solar (LESES) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN-FRBA), Villa Lugano, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (58,48°, 34,58°), se creó en 2006. Cuenta con un banco de pruebas ubicado en una plataforma exterior, equipado con lo necesario para realizar el ensayo de rendimiento colectores solares según los lineamientos de la norma IRAM 210002, el ensayo de predicción de la producción anual de energía en sistemas solares compactos de la norma 210004 y los ensayos de durabilidad de las normas 210015 y 210022 correspondientes a la primera etapa del Reglamento Técnico (Res.753/2020) del Ministerio de Producción. El banco cuenta con una estación meteorológica que mide las siguientes variables: temperatura, presión, humedad, precipitación, velocidad y dirección del viento en el plano del colector. También, se dispone sobre el plano del colector de medición de radiación solar global y difusa. En la Figura 4 se muestra una imagen y el diagrama de procesos del banco de ensayos ubicado en la plataforma exterior. Allí se puede ver la estructura con espacio para montar 2 colectores, un piranómetro para medir radiación global, otro con un disco de sombreado para medir radiación difusa, y la estación meteorológica. Por detrás de los colectores se ve el tanque de almacenamiento de agua.

El GES de la Facultad de Ingeniería de la UNRC, creado en 1995, inició en 2006 la realización de ensayos térmicos de colectores y sistemas compactos, a requerimiento de algunos fabricantes e importadores que deseaban saber las prestaciones energéticas de sus equipos. Antes de la edición de la

IRAM 210004, se realizaron ensayos de equipos compactos con la norma internacional ISO 9459-2 (Garnica et al., 2010), entregando a los solicitantes informes de acuerdo a lo establecido en esta última norma. Cuenta el GES actualmente con una máquina móvil para la realización de ensayos de colectores solos y de equipos compactos. Se muestra una vista de la misma en la Figura 5.

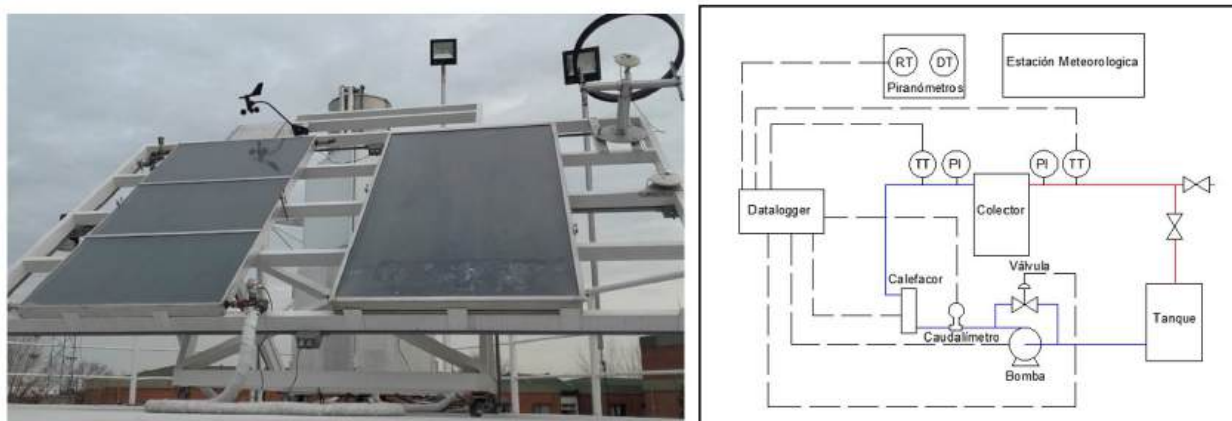


Figura 4: Banco de ensayo del LESES y su diagrama de proceso de medición.

Allí se observa el panel frontal con las válvulas hidráulicas para distintas conexiones, los caudalímetros para uno u otro ensayo y la caja de maniobras eléctricas. El equipo cuenta por dentro con tres tanques aislados de 100 litros cada uno, dos bombas centrífugas y 6 resistencias de 1500 W cada una. Estos elementos, más sensores de temperatura externos y una estación meteorológica Davis, permiten realizar los ensayos establecidos en las IRAM 210004 e IRAM 210002-1. En la vista posterior se pueden ver las conexiones hidráulicas que van y vienen de los colectores y sistemas compactos a ensayar.



Figura 5: Máquina móvil de ensayos térmicos solares del GES de la UNRC

EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN DISTINTAS CIUDADES DE ARGENTINA

En la Unión Europea, hay un organismo centralizado, The Solar Keymark (ESTIF, 2023) que tiene la base de datos de todos los equipos que se comercializan en los países socios, y los cuales han sido caracterizados mediante la ya mencionada EM 12976-2. Hay allí 24 laboratorios autorizados para realizar los ensayos según la ISO 9459-2 (equivalente a la IRAM 210004) y la ISO 9459-5 que es otra opción de ensayo. Esta última, la ISO 9459-5 responde al uso de un software privado, el cual no ha sido adquirido por ningún organismo de Argentina. El uso de una u otra norma es optativo, sus errores y grados de incerteza han sido medidos y catalogados, difieren algunos puntos y en complejidad de medición y de cálculo. (Carvalho y Naron, 2000)

Las cuatro ciudades que toma Europa para su evaluación por defecto se muestran en la Figura 6, y son: Atenas (A), Davos (D), Wuerzburg (W) y Estocolmo (E). Se encuentran allí indicadas con su correspondiente latitud. Esto es a efectos comparativos para analizar la situación de Argentina. Aunque un clima depende de múltiples factores (altura, lejanía del mar, humedad relativa, etc.), la latitud es una variable central que indica horas de sol y temperaturas en distintas épocas del año. Los mapas están a escala y es evidente que la longitud Norte-Sur de nuestro país ofrece una variabilidad de climas muy superior a Europa. Se indican los valores de variación de latitud (Δ) entre ciudades importantes. Para Argentina San Salvador de Jujuy (SSJ) y Usuahia (U), en la Figura 6.

Emulando la 12976-2, deberían seleccionarse ciudades representativas que permitan orientar a quienes leen los informes de la norma, para ver qué ciudad cercana le permitiría inferir la fracción solar que puede dar uno u otro equipo compacto. Pero además de larga, Argentina es ancha y, por ejemplo, aunque a unas latitudes no muy lejanas, la radiación solar de San Juan es un 20 % superior a la de Buenos Aires. Cabría así preguntarse si cuatro ciudades serían suficientes para caracterizar equipos compactos en Argentina. Se indican allí otras ciudades como Posadas (P), La Rioja (LR), Mendoza (M), Santa Rosa de la Pampa (SRP), San Carlos de Bariloche (SCB) y Comodoro Rivadavia (CR). Además, deberían estudiarse qué criterios primarían para la elección de una u otra ciudad. Obviamente deberán ser representativas de cada región, y a su vez debería contarse con datos climático confiables para la realización de las predicciones energéticas. Debe tenerse en cuenta que por más que se determinen ciertas ciudades por defecto, siempre cabe la posibilidad de extender el cálculo a cualquier otra, siempre que se tengan sus datos climáticos anuales.

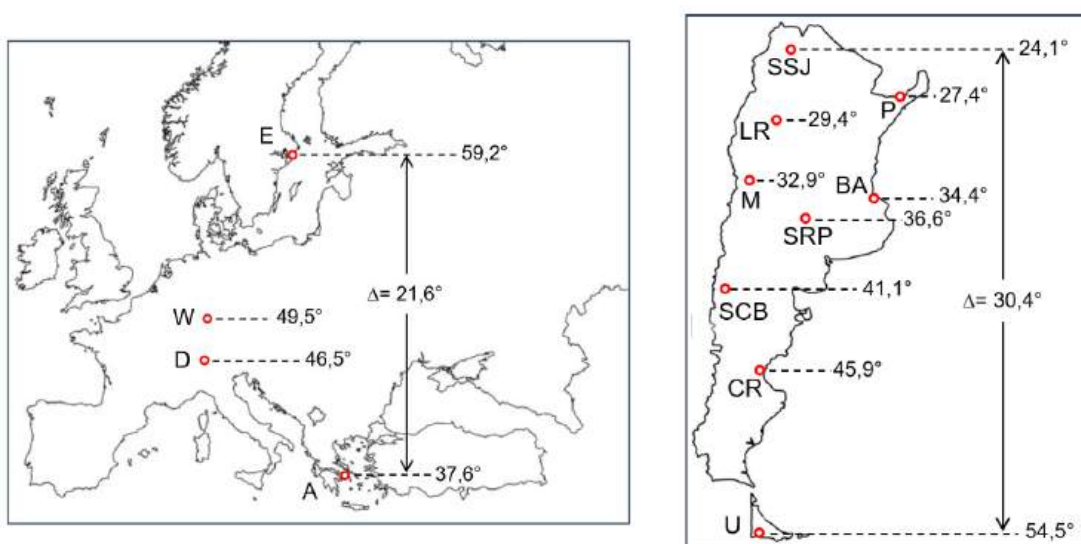


Figura 6: Ciudades que toma la UE para la EN 12976-2 y comparación con ciudades argentinas

Se cuenta en el país con un Servicio Meteorológico que proveería los datos de temperatura que harían falta. La radiación solar es un dato más difícil de conseguir, pero por suerte, hay en Argentina un grupo de investigación de la Universidad Nacional de Luján que hace años viene recolectando y procesando datos de distintos lugares del país, y se encuentra además colaborando con IRAM en la discusión de esta nueva norma que se propone en el presente artículo.

El GERSolar es un grupo de estudios destinado a realizar actividades diversas relacionadas con la energía solar. Fue creado el 2 de septiembre de 2002 y forma parte actualmente del Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES) de esta Universidad. Su objetivo prioritario es la evaluación del recurso solar en la República Argentina. Para ello se propone mejorar el conocimiento de la distribución espacio-temporal de la irradiación solar global incidente sobre la superficie terrestre a fin de optimizar el diseño de sistemas de aprovechamiento de esta fuente de energía para el mejoramiento de la calidad de vida de poblaciones aisladas, su empleo como fuente primaria de energía en la generación eléctrica y el calentamiento de agua. En el año 2002 se ha publicado, con financiamiento de la Secretaría de Ciencia y Tecnología, el Atlas de Energía Solar de la República Argentina donde se presenta un grupo

de cartas con la distribución mensual de los promedios diarios de la irradiación solar global y de las horas de brillo solar (heliofanía efectiva) (Grossi Gallegos y Righini, 2002). Trabajo que fue actualizado en 2004 (Righini y otros, 2004). Este estudio continúa hasta nuestros días en dos líneas de trabajo, una de ella se basa en el uso de imágenes satelitales, y la otra en la medición en tierra en estaciones distribuidas en la región pampeana. Esta trayectoria permite al GERSolar conocer, con cierto grado de exactitud, el recurso solar en nuestro país.

Como ejemplo, se toman los resultados obtenidos de un equipo termosifónico de placa plana ensayado en el GES para las ecuaciones (1) y (2) y siguiendo las indicaciones de la norma para los cálculos sucesivos día a día durante un año se realizan proyecciones para dos ciudades distintas de Argentina, Ciudad Autónoma de Buenos Aires y La Rioja. Para el cálculo de la demanda se considera que el agua de alimentación del equipo solar compacto está a la temperatura ambiente media de las 24 horas del día antes del inicio de la absorción de radiación solar, y se la debe llevar a 44 °C (algo más de la temperatura estimada de baño). Así, la energía calórica demandada, Q_{dem} , se puede calcular mediante la siguiente la ecuación calorimétrica.

$$Q_{dem} = c.m.(44\text{ }^{\circ}\text{C} - T_{amb,av}) \quad (3)$$

c = Calor específico del agua

m = masa de agua en el almacenador

$T_{amb,av}$ = temperatura media ambiente de las 24 horas anteriores a la absorción de radiación.

Los datos horarios deben ser procesados, ya que en la ecuación (1) H es la radiación solar global sobre el colector (los datos disponibles son los horizontales), y de las temperaturas que están entre paréntesis, para una de ellas hay que sacar el promedio solo de las horas durante las cuales hay luz solar. Todo este trabajo lo realizar un algoritmo preparado a tal efecto. Los datos que se cargan son horarios.

Los resultados están ordenados mes por mes y se pueden ver las diferencias entre los valores de radiación solar global horizontal y temperatura ambiente (columnas 2 y 3) de ambas ciudades. El calor demandado fue calculado a partir de la ecuación (3) y el calor útil con una combinación de las ecuaciones (1) y (2), un patrón de mezclado y una curva normalizada de descarga para el equipo (todo esto siguiendo las directivas de la norma IRAM 210004). El resultado que muestra claramente las diferencias de un mismo equipo en ciudades distintas, para igual demanda, es el valor de la fracción solar anual, última fila de la sexta columna, donde para La Rioja da un valor de 0,86, mientras que para CABA es de sólo 0,62.

Tabla 1: Comparación de la proyección energética anual para dos ciudades

Localidad: La Rioja Latitud: 29°24' S Longitud: 66°51' O						
mes	H [MJ]	Tamb [°C]	Qdem [MJ]	Qutil [MJ]	Fs	Eficiencia Media
Enero	23,40	27,10	325,21	386,35	1,19	0,45
Febrero	22,79	25,50	297,43	341,83	1,15	0,41
Marzo	18,29	23,40	353,31	375,73	1,06	0,44
Abril	15,52	19,80	392,95	354,25	0,90	0,42
Mayo	13,50	15,20	480,45	359,54	0,75	0,40
Junio	9,79	10,90	544,31	274,68	0,50	0,39
Julio	10,69	10,80	607,24	305,97	0,50	0,41
Agosto	14,80	14,30	598,93	406,40	0,68	0,46
Setiembre	19,30	17,30	547,26	476,25	0,87	0,51
Octubre	22,50	22,90	483,08	499,63	1,03	0,52
Noviembre	24,19	25,40	400,45	444,67	1,11	0,51
Diciembre	24,52	27,50	353,93	417,88	1,18	0,48
		Totales	5384,54	4643,19	0,86	0,45

Localidad: CABA Latitud: 34°36' S ; Longitud: 58°23' O						
mes	H [MJ]	Tamb [°C]	Qdem [MJ]	Qutil [MJ]	Fs	Eficiencia Media
Enero	22,39	25,10	394,83	377,09	0,96	0,46
Febrero	20,59	23,70	347,25	299,95	0,86	0,40
Marzo	17,10	21,40	400,37	344,75	0,86	0,43
Abril	12,82	17,70	433,47	269,51	0,62	0,39
Mayo	9,50	14,30	510,41	214,85	0,42	0,34
Junio	7,20	11,20	557,31	181,27	0,33	0,35
Julio	8,60	10,90	613,88	229,15	0,37	0,38
Agosto	11,41	12,70	616,58	284,19	0,46	0,42
Septiembre	14,18	14,20	583,70	318,50	0,55	0,46
Octubre	18,22	17,70	555,19	372,07	0,67	0,48
Noviembre	21,71	20,60	484,24	381,77	0,79	0,48
Diciembre	23,18	23,20	445,08	388,70	0,87	0,47
		Totales	5942,30	3661,80	0,62	0,43

Se está tratando actualmente en el Comité de Energía Solar Térmica de IRAM un proyecto de norma similar a la EN 12976-2 para nuestro país y se espera tener un avance importante hacia fin de año. IRAM es el Instituto Argentino de Normalización y Certificación, una asociación civil privada sin fines de lucro con más de 85 años de trayectoria y es el único representante de ISO en la Argentina. IRAM

trabaja en el desarrollo de normas técnicas, ofrece servicios de evaluación de la conformidad y capacitación. Así como facilita el acceso a documentos de valor como son las normas nacionales, regionales e internacionales, a través de su centro de documentación que cuenta con la mayor fuente bibliográfica de Latinoamérica. Como organización proveedora de servicios, IRAM concentra sus esfuerzos en facilitar, mejorar y hacer más segura la vida de las personas, agregando valor a organizaciones de todo tipo y tamaño en materia de competitividad, sostenibilidad y acceso a mercados. IRAM es el organismo nacional de normalización de la Argentina y participa en diferentes organizaciones internacionales, hemisféricas y regionales de normalización, presentando la posición de los sectores representativos interesados correspondientes de la Argentina. En este sentido genera documentos técnicos que representan el estado de la ciencia y de las mejores prácticas en un momento dado, y contienen información consensuada por todas las partes interesadas (consumidores, empresas e intereses generales).

CONCLUSIONES

Es necesario poder estimar cuánta energía puede reemplazar cada equipo en el lugar donde se va a instalar, es decir, su fracción solar anual, que será directamente proporcional al ahorro monetario que obtendría el eventual comprador del equipo.

Hay laboratorios capacitados en el país para realizar los ensayos según IRAM 210004 y para conseguir los datos de radiación solar y temperatura ambiente necesarios para correr las simulaciones de predicción de energía.

Se puede elaborar una normativa de fácil interpretación para los vendedores e instaladores. Solo tienen que saber en qué lugar del certificado del equipo tienen que leer la fracción solar que daría en uno u otro clima en que va a ser instalado.

Hace falta la aprobación de una ley nacional de energía solar térmica que ordene todo el sistema nacional, y contemple otros elementos positivos para la difusión y buena administración del tema. Entre otras cosas se podría:

- (a) Crear un organismo similar al de la UE que englobe a todo el país.
- (b) Desarrollar instancias de capacitación de instaladores (expansión de lo hecho por INII) y crear un registro de instaladores matriculados a los cuales puedan recurrir los potenciales usuarios.
- (c) Otorgamiento de beneficios para fabricantes y usuarios en cuanto a créditos a baja tasa, exenciones impositivas, aduaneras, etc., que incentiven la inversión.
- (d) Contabilizar los metros cuadrados instalados para saber el ahorro energético que se realiza y los gases de efecto invernadero que se dejan de emitir a la atmósfera.

Deben aún discutirse las ciudades que serán incluidas por defecto en la norma que se genere. Obviamente estaría Buenos Aires entre las elegidas, dada su importancia y cantidad de habitantes en sus alrededores. En esa actividad están actualmente abocadas el Comité Solar Térmico y varios grupos de investigación de universidades nacionales. Son bienvenidos los aportes que puedan hacer los interesados en este tema que provengan de cualquier ámbito afín.

REFERENCIAS

- Arraña I., Bertinat P., Chemes J., Di Ruscio N. y Garrido S. (2022) Políticas públicas implícitas y explícitas para la transición energética en la Argentina. El caso del Programa de Desarrollo de la Industria Solar Térmica (PRODIST). *Prácticas de oficio, Investigación y Reflexión en Ciencias Sociales*, Vol. 1, nro 29, pp. 39-53.
- Carvalho M.J., Naron D.J. (2000) Comparison of test methods for evaluation of thermal performance of preheat and solar-only factory-made systems. *Solar Energy*, Vol 69 (suppl.), pág. 145-156.
- EN 12976 (2000) Thermal Solar Systems and Components. *Factory Made Systems — Part 2: Test Methods*.
- ESTIF [en línea] The Solar Keymark. ESTIF - the European Solar Thermal Industry Federation. Dirección URL: <<http://www.estif.org/solarkeymarknew/>> [consulta: 10 de agosto de 2023]

- Garnica, J.H.; Lucchini, J.M.; Stoll, R.G.; Barral, J.R. (2010). Ensayos normalizados de colectores solares y sistemas de calentamiento de agua en Argentina: análisis de la situación, avances y dificultades. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14(3), 147-154.
- Gil S. (2021) Eficiencia energética en Argentina - Sector residencial – Agua caliente sanitaria. GFA Consulting Group. <https://www.eficienciaenergetica.net.ar/img_publicaciones/04271009_03.SectorResidencial-ACS.pdf>
- Grossi Gallegos H., Righini R. (2002) Atlas de energía solar de la República Argentina. Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 74 p. + 1 CD-ROM (ISBN 978-987-9285-36-7)
- INTI [en línea] Instaladores de Sistemas Solares Térmicos, Nivel II, Dirección URL: <<https://www.inti.gov.ar/areas/servicios-regulados/certificaciones/organismo-de-certificacion/tramites/instaladores-de-sistemas-solares-termicos-nivel-ii>> [consulta: 28 de junio de 2023]
- IRAM (2016) IRAM 210004 Métodos de ensayo exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 56 pp.
- Nores Pondal, F. J.; Purucker, M.; Garreta, F.; García Zuloaga, G.; Scheinckman, M.; Morale, M.; Calvo, B.; Abraham, A.; Haim, A. (2016) Ensayo bajo Norma IRAM de colectores solares planos y de tubos evacuados. Comparación de características. XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), La Plata, Argentina.
- Placco C., Saravia L., Cadena C. (2010) Informe Técnico sobre Colectores Solares para Agua Caliente. Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO), Salta, Argentina.
- Queipo G. y Pasetti G. (2022) Energía solar térmica: oportunidades para la industria argentina. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Libro digital <https://www.inti.gov.ar/assets/uploads/files/economia-industrial/01-2023/Energia_solar_termica_Final.pdf>
- Righini R.; Grossi Gallegos H.; Raichijk C. (2004) Trazado de nuevas cartas de irradiación solar global para Argentina a partir de horas de brillo solar (Heliofanía) *Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol.14, pp. 23 – 31.
- Sabre M., Pereira G., Medel N., Pescio F., Chiaravallotti A., Bornancin M., Cordi M., Lunardelli G. y Quiroga L. (2020) Censo Nacional Solar Térmico 2020 - Informe Período 2019. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Buenos Aires.
- Tügel, J y Sogari N. (2019) Stratification by Natural Convection directed to improve Energy Autonomy; Development of an integrated collector storage solar water heater. Proceedings of ISES Solar World Congress 2019, pp. 73-84, Santiago, Chile.
- Weiss W. y Spörk-Dür M. (2023) Solar Heat Worldwide, Global Market Development and Trends 2022, Detailed Market Figures 2021. Solar Heating & Cooling Programme. International Energy Agency.

A STANDARD TO THERMALLY CHARACTERIZE RESIDENTIAL COMPACT SOLAR WATER HEATERS IN ARGENTINE REPUBLIC

ABSTRACT: This paper describes a study performed in order to develop a standard to thermally characterize residential compact solar water heaters of the Argentine Republic. The motivation for this work originated from the installation of systems without a well-known service that they can provide for different climatic conditions and hot water demands. The use of an IRAM norm is proposed, which is based on international standards. This norm allows testing a compact system, giving as a result an equation to estimate the daily hot water production for a whole discharge of the storage. Different technologies to which this norm applies are explained and de measurements to perform are described. This study is based in a standard of the European Union, which takes four cities of different geographical regions as default to perform de evaluation following the standard indications. A comparative analysis is made based on different latitudes of Argentine cities. As an example, estimations to predict the annual energy production of the same system for two different cities were made, and notable differences in solar fraction were obtained. Finally, a series of aspects are considered, in order to work looking for a better residential solar thermal energy use.

Keywords: compact solar water heaters, energy production, climate, tests, standards.

METODOLOGIA PARA INSPEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA

Luiz Carlos P. de Souza Junior^{1,2}, Chigueru Tiba^{1,2}, Elielza M. S. Barbosa^{1,2}

¹Centro de Energias Renováveis (CER) da Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE). Av. da Arquitetura s/n, Recife-PE, Brasil

²Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE). Av. Prof. Luiz Freire, s/n, Recife-PE, Brasil.

Tel. +55 81 2126-7326 (CER-UFPE) e-mail: luiz.souza@ufpe.br

RESUMO: Para otimizar o desempenho de uma usina FV (fotovoltaica) é necessário conhecer e diagnosticar preventivamente potenciais anomalias funcionais. Dentro deste contexto, foram testados e verificados procedimentos termográficos e elétricos para diagnósticos de módulos e sistemas FV. O objetivo desse estudo foi desenvolver uma metodologia eficiente de inspeção de falhas em sistemas FV baseado na utilização de câmeras termográficas. Inicialmente foram montados arranjos onde cada módulo foi testado eletricamente através do traçador de curvas IxV e termograficamente pela câmera termográfica. Também foram montados arranjos com esses módulos em conjunto, ligados em série, para novos ensaios com a utilização da câmera embarcada ao drone. Com esses ensaios identificamos a influência dos fatores geométricos e climáticos e a necessidade em calibrar adequadamente os equipamentos de medição. Também pudemos identificar a variação dos parâmetros elétricos dos módulos e mensurar a taxa de degradação desses, além de identificar os pontos quentes dos módulos do sistema. A análise dos termogramas que foram realizados tanto no solo (terrestre) quanto em sobrevoos com drone (aéreo), mostraram que são totalmente consistentes e identificaram as mesmas células quentes nos diversos módulos dos arranjos.

Palavras-chave: geração distribuída, energia solar, manutenção, termografia, drone, caracterização elétrica.

INTRODUÇÃO

Em 2022, a energia solar se destacou mundialmente devido ao aumento de 175 GW (gigawatts) de nova capacidade e chegou a um total de cerca de 942 GW, o que significou um aumento aproximadamente de 20% em relação ao ano anterior (REN21, 2022). Em função deste crescente tamanho em número e dimensão dos sistemas FV (fotovoltaicos), os métodos convencionais de diagnóstico de falhas por medição elétrica módulo a módulo ou string a string, são impraticáveis em termos de tempo e economia para sistemas muito grandes e, por isso, se faz necessário desenvolver uma nova metodologia adequada de inspeção e manutenção preventiva.

Diferentes técnicas de inspeção de módulos fotovoltaicos foram elaboradas e convertidas em métodos de verificações locais ao longo dos últimos anos (MÜHLEISEN et al., 2019). Esses métodos variam desde procedimentos básicos de inspeção visual, da verificação da curva IxV e de técnicas mais elaboradas como eletroluminescência, fotoluminescência, espectroscopia e termografia infravermelha (COSTA et al., 2021).

Sob este contexto, o diagnóstico via imagem termográfica tem o potencial de permitir a análise operacional do sistema de forma não intrusiva e extremamente rápida, resultando em uma manutenção preventiva e corretiva mais eficiente e segura, de modo a maximizar a disponibilidade e a confiabilidade da produção da usina FV (fotovoltaica). Além disso, a termografia IV pode ser combinada com VANTs

(veículos aéreos não tripulados) com o objetivo de acelerar o procedimento de identificação de falhas em usinas com difícil acesso, seja em telhados, em fachadas ou grandes campos de módulos FV (AGHAEI et al., 2014; DE OLIVEIRA et al., 2019; QUATER et al., 2014; TSANAKAS e BOTSARIS, 2012).

Com o principal objetivo de desenvolver uma metodologia potencialmente rápida e eficiente de inspeção de falhas em sistemas / módulos FV baseado na utilização de câmeras termográficas, este estudo buscou também calibrar adequadamente câmeras de baixo custo de acordo com as condições meteorológicas e geométricas dos arranjos FV. Além disso, procurou identificar falhas operacionais por meio de imagens termográficas, visuais e medições elétricas e também detectar defeitos em módulos FV com longa vida útil (15 anos de uso). Um importante estudo que compara a termografia embarcada ao drone com a termografia manual em solo (terrestre) pode ser visto na Tabela 1 (BLISS, 2023):

Tabela 1: Comparação entre a inspeção manual e inspeção com drone

	SITE1	SITE2	SITE3	SITE4
SITE	74 MW	30 MW	21 MW	12,5 MW
TEMPO DE INSPEÇÃO POR DRONE	24 h	6 h	7 h	4 h
TEMPO DE INSPEÇÃO MANUAL	778 h	293 h	208 h	195h
HORAS DE TRABALHO PERIGOSAS EVITADAS	754 h	287 h	201 h	191h
EFICIÊNCIA AUMENTADA	97%	98%	97%	98%
ECONOMIA DE CUSTOS	\$ 68.399	\$ 25.485	\$ 17.063	\$ 19.552

No estudo citado, quatro usinas FV centralizadas com capacidades na faixa de 12,5 a 74 MW (megawatts) foram comparadas no que se refere ao processo de inspeção termográfica aérea com drone e terrestre (manual). A conclusão foi de que a inspeção por drone é 97% mais rápida do que a manual. O uso do drone praticamente elimina o trabalho perigoso e os custos evitados podem resultar em média US\$1.254/MW.

METODOLOGIA

Os ensaios termográficos e elétricos deste trabalho foram realizados na Área de Testes do Grupo de Fontes Alternativas de Energia do Centro de Energias Renováveis do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco. O arranjo foi montado com módulos FV policristalinos PWX 500 do fabricante Photowatt® International S.A.

Inicialmente quinze módulos foram testados em um arranjo de forma isolada, painel a painel. Cada módulo foi testado eletricamente através do traçador de curvas IxV e termograficamente pela câmera termográfica. Após a análise dos módulos de forma isolada, um novo arranjo foi confeccionado com todos os módulos ligados em série onde mais uma vez foram realizadas as medições elétricas e termográficas do conjunto completo.

O período de realização das análises dos módulos foi dos meses de dezembro de 2021 a dezembro de 2022. As coordenadas de localização dos testes foram 8°03'17.6"S 34°57'19.0"W.

A Figura 1 apresenta o registro fotográfico dos arranjos com uso do tripé para medições em solo e com ajuda do drone para as medições aéreas.

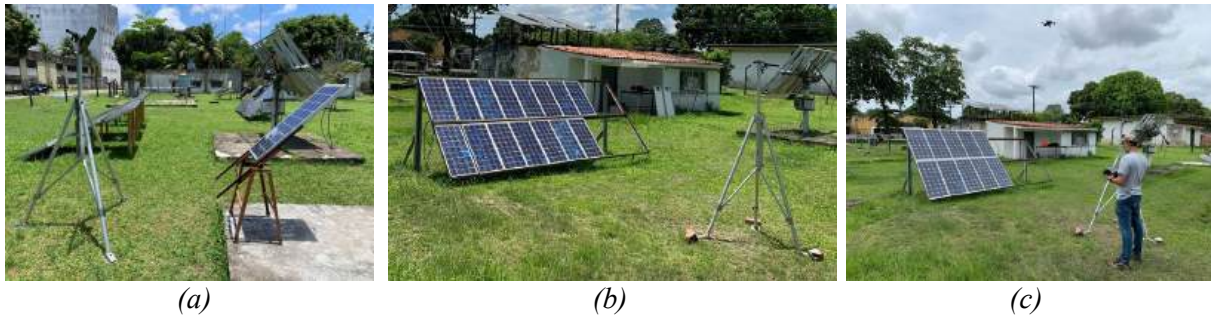


Figura 1: Arranjos FV, (a) Módulo isolado, (b) Módulos em série, (c) Módulos em série com medição por drone.

Todos os experimentos sempre foram iniciados com a limpeza dos módulos FV com pano úmido. Esses módulos sempre estiveram posicionados no mesmo local à 30 NE e com o mesmo cenário ao redor para manter constante a possível interferência da vizinhança sobre o experimento.

Os dados da estação solarimétrica da área de testes do grupo FAE/UFPE foram coletados para verificação dos parâmetros de temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa do ar (U_{ar}) e velocidade do vento média (V_{vm}), individualmente, para cada intervalo de medição dos módulos.

Todas as medições foram realizadas sob condições de céu claro, com irradiância maior ou igual a 600W/m^2 e velocidade do vento menor que 2m/s para obtenção de maior assertividade nas medições.

Calibração da temperatura média refletida do módulo FV

Considerando que a radiação que parte de uma superfície é o resultado da junção da radiação emitida por ele mesmo, e depende de sua temperatura, com a radiação refletida, que depende da temperatura da vizinhança e ainda que o elemento sensor do termovisor não é capaz distingui-las, foi aplicado um procedimento simples onde utilizou-se uma folha de alumínio no seu lado mais espelhado (teste do papel alumínio), no mesmo ângulo de visão da captação normal do termovisor, para determinar a temperatura refletida, sendo então tal parâmetro passível de ser ajustado, possibilitando compensar a radiação advinda dos arredores.

Para a calibração deve-se ajustar seus parâmetros de aquisição para emissividade unitária (igual a um) e distância nula, para registro apenas da temperatura aparente. Finalmente, deve-se focar no papel alumínio, que tem a função de anteparo, para registro da temperatura média nesta região, a qual corresponde à temperatura média refletida (CEMIG, 2010).

Calibração da emissividade (e) do módulo FV

Com relação à emissividade, parâmetro de grande importância na acuracidade dos valores de temperatura medidos neste estudo, para estimá-la foi utilizado um método comparativo, onde utilizou-se uma fita de alta emissividade ($e_{fita} = 0,95$) sobre a superfície do módulo FV. Após atingir o equilíbrio térmico entre a fita e este módulo, foi realizado o registro termográfico sobre a superfície padrão e ajustado o termovisor para o valor de emissividade da fita para obtenção da temperatura real do módulo, a qual é utilizada como referência. Finalmente, verificou-se a superfície do módulo e ajustou-se a emissividade no termovisor até que a temperatura registrada fosse igualada à temperatura de referência obtida previamente.

Captação e processamento das imagens

Essas imagens foram submetidas a edições no software FLIR® Thermal Studio, onde foi utilizada a paleta de cores Rainbow HC. Já para a identificação da temperatura foi seguido um padrão determinado de cores e inseridos pontos de temperatura em locais definidos nos módulos. Todos os parâmetros obtidos na estação solar como temperatura média do ar (T_{ar}), umidade relativa (U_{ar}), além dos aferidos como emissividade (e) e temperatura média refletida frontal (TMRF) foram inseridos neste software para aferição da temperatura nos pontos de interesse.

Avaliação do Termograma e ações recomendáveis

A inspeção termográfica do módulo/arranjo FV é um procedimento do plano de manutenção preventiva e, portanto, sua análise e conclusões necessariamente vão resultar na recomendação de alguma ação preventiva ou mesmo corretiva. Após a constatação da ocorrência de anomalias na temperatura do módulo, com base em Jahn et al. (2018), categorizam-se 3 situações com as respectivas recomendações de ações:

- **Célula Normal:** Se o gradiente de temperatura entre uma célula FV e a temperatura de uma célula saudável no módulo FV for menor que 10°C, a situação será considerada um caso normal; não problemático e, portanto, sem nenhuma recomendação;
- **Célula aquecida:** Se o gradiente de temperatura entre uma célula FV e a temperatura de uma célula saudável no módulo FV, for entre 10°C a 20°C, a situação será considerada um caso que requer atenção e rastreamento nas próximas inspeções termográficas e;
- **Ponto quente:** Se o gradiente de temperatura entre uma célula FV e a temperatura de uma célula saudável no módulo FV for maior que 20°C, a situação irá provocar uma degradação importante na potência, além de potencialmente colocar em risco a integridade do módulo, podendo provocar incêndio e resultando em problemas de segurança. A recomendação neste caso é a troca de módulo.

RESULTADOS

Os resultados serão apresentados e discutidos considerando as medições realizadas nos módulos Photowatt® de forma isolada e depois no arranjo com os respectivos módulos ligados em série e com aquisição de termograma no solo e depois embarcado no drone.

Experimento 1: Módulo Photowatt® série 884436

O experimento no módulo Photowatt®, série 884463, foi realizado no dia 18.11.2022 no período entre 10:59h e 11:15h. Neste intervalo foram coletados os seguintes dados meteorológicos da estação solarimétrica: Velocidade do vento média (VVM): 1,46 m/s; Temperatura do ar média (Tar): 30,60°C; Umidade relativa do ar média (Uar): 61,64.

Medição da temperatura média refletida frontal – TMRF

Após a coleta dos dados meteorológicos da estação solarimétrica, foi realizada a calibração da temperatura média refletida frontal (TMRF), utilizando uma folha de papel alumínio.

No editor de imagens Flir® thermal Studio foram inseridos os dados meteorológicos e configuradas a emissividade unitária e a distância nula.

O termograma obtido resultou uma temperatura média refletida (TMRF) da parte frontal do módulo de 35,4°C.

A Figura 2 a seguir exibe o experimento e o termograma, respectivamente:



(a)



(b)

Figura 2: Registro fotográfico da folha de papel alumínio afixado ao módulo Photowatt®, (a) imagem no espectro visível, (b) termograma.

Calibração da emissividade (e) para a parte frontal do módulo

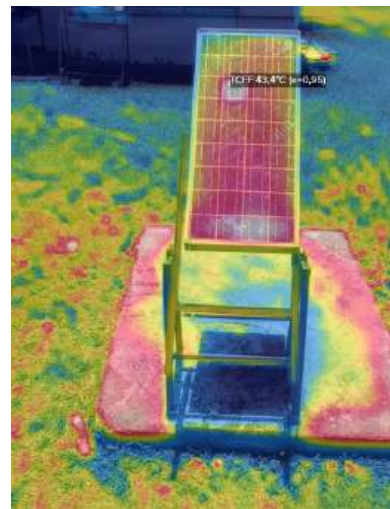
A calibração da emissividade (e) da parte frontal do módulo foi feita mediante um procedimento conhecido como teste da fita.

A fita, de emissividade conhecida (0,95), foi colocada na superfície do módulo conforme podemos observar na Figura 3 e após alguns minutos, quando a fita e o módulo atingiram o equilíbrio térmico, foi aferida a temperatura sobre a fita e sobre a célula onde ela estava afixada.

A comparação da temperatura da fita apenas com a temperatura da célula onde ela está afixada é fundamental, pois haverá um aquecimento sobre esta célula devido ao sombreamento causado pela fita nesta célula e portanto, as outras células não devem ser comparadas.



(a)



(b)

Figura 3: Teste da fita para calibração da emissividade, (a) Imagem no espectro visível, (b) termograma

A temperatura da fita na parte frontal do módulo (TCFF) com a emissividade conhecida, ($e = 0,95$) foi comparada com a temperatura aferida na mesma célula próximo à fita (TSFF). Após aferição desta última, foi ajustada sua emissividade até obtenção da mesma temperatura da fita.

Foi observado conforme Figura 4 que a temperatura na fita, que tinha a emissividade conhecida ($e=0,95$), igualava à da célula apenas quando foi ajustada a emissividade para 0,93.



Figura 4: Imagem IV aproximada da célula com as temperaturas aferidas sobre a fita isolante e logo abaixo da fita (na mesma célula).

A seguir, a Figura 5 mostra finalmente a parte frontal do módulo com emissividade calibrada e temperaturas em diversos pontos:

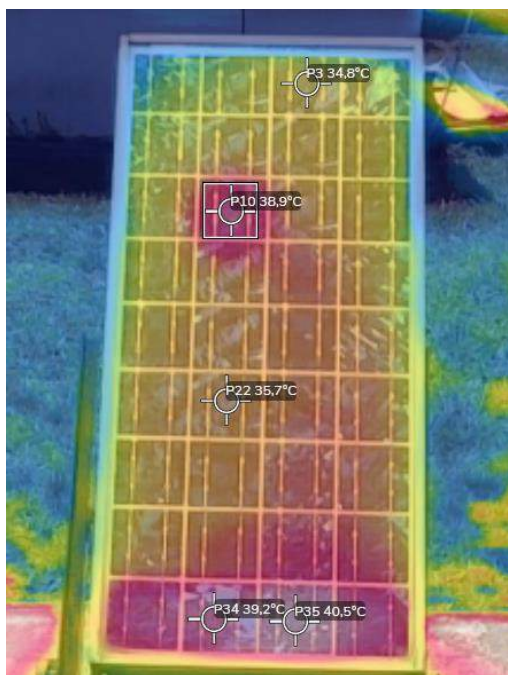


Figura 5: Imagem IV frontal do módulo Photowatt® com emissividade Calibrada

Experimento 2: arranjo em série com módulos Photowatt®

O experimento com os módulos Photowatt®s ligados em série foi realizado no dia 14.12.2022 no período entre 10:32h e 10:40h. Neste intervalo de tempo coletamos os seguintes dados da estação solar: Velocidade do vento média (Vvm): 1,39 m/s; Temperatura do ar média (Tar): 31,44°C; Umidade relativa do ar média (Uar): 58,10.

Seguindo a mesma metodologia dos arranjos com módulos isolados foi realizada a calibração da temperatura refletida aparente da parte frontal deste arranjo (TMRF) em 29,9°C, utilizando-se a folha de papel alumínio.

Termografia do arranjo Photowatt® ligado em série

Considerando os experimentos anteriores, para os ensaios com os módulos em série, o aplicativo Flir® Thermal Studio foi configurado com a emissividade em 0,95, visto que, com esse valor, a variação na parte frontal do módulo é pequena para aferição das temperaturas. Portanto, foi dada sequência às medições inserindo-se todos os parâmetros climáticos e geométricos obtidos através da estação solarimétrica e do arranjo montado conforme pode ser observado na Figura 6:

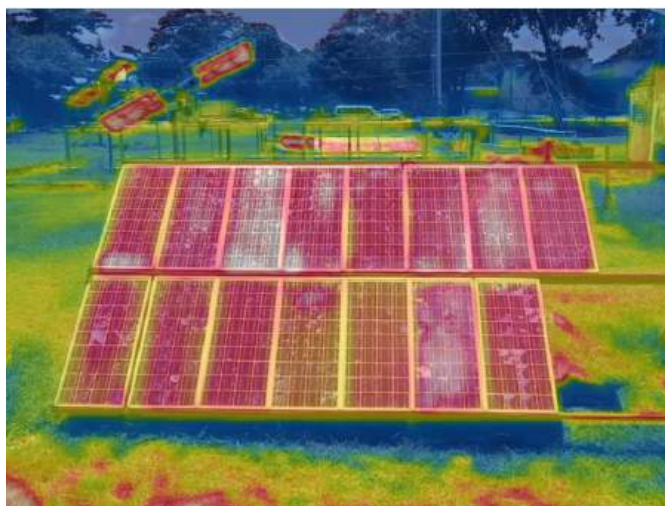


Figura 6: Imagem IV frontal de módulos Photowatt® em série

A Figura 7 representa a curva IxV dos módulos Photowatt® ligados em série:

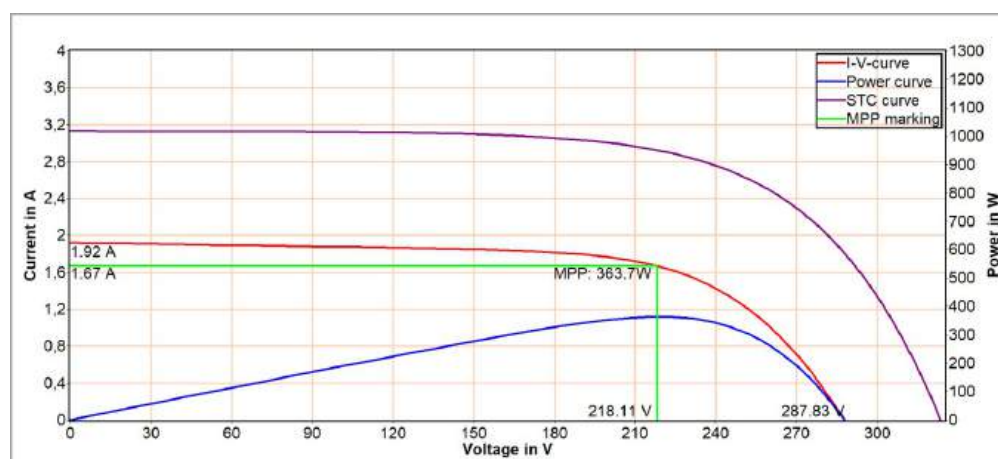


Figura 7: Curva IxV e PxV do arranjo Photowatt® em serie

Na tabela 2, são exibidos os valores da curva IxV medida, da curva em STC (Standard test conditions – Condições padrão de teste) e dos valores de referência do catálogo com os respectivos parâmetros onde Pmax: potência máxima; Ip máx: corrente máxima; UP máx: tensão máxima; Isc(a): corrente de curto-circuito; Uoc(V): tensão de circuito aberto; Rs (Ohm): resistência em série; Rp (Ohm): resistência em paralelo; FF (%): fator de forma; Eeff (W/m2): irradiância; Tmod (°C): temperatura do módulo.

Tabela 2: Dados da curva $I \times V$ do arranjo Photowatt® em série

Parâmetro	Medido	STC	Referência
Pmax (W,Wp)	363,7	662	750
Ip max(a)	1,67	2,72	2,9
UP max (V)	218,1	243,6	258
Isc (a)	1,92	3,13	3,10
Uoc (V)	287,8	323,62	324
Rs (Ohm)	33,6	24,3	9,7
Rp (Ohm)	>7,3	>5,1	>5,5
FF (%)	65,9	65,4	74,5
Eeff(W/m2)	613	100	1000
Tmod (°C)	38	25	25

Para o arranjo Photowatt® ligado em série, a perda na potência foi de 11,73%, a resistência série sofreu uma elevação de 150,51%, e o FF diminuiu 12,21%.

Termografia com drone dos arranjos com módulos Photowatt® ligados em série

As imagens aéreas foram realizadas por drone com a câmera à 45° em relação à normal a uma altura aproximadamente de 6 metros.

A comparação entre os termogramas dos arranjos ligados em série, obtidos com a câmera em solo (no tripé) e com a câmera acoplada ao drone, permitiu observar que nas duas imagens da Figura 8, os pontos quentes se repetiram de forma consistente nas mesmas células. Com isso o procedimento de inspeção aérea fica viabilizado tendo como requisitos prévios as diversas calibrações no solo em uma pequena parte do campo solar.

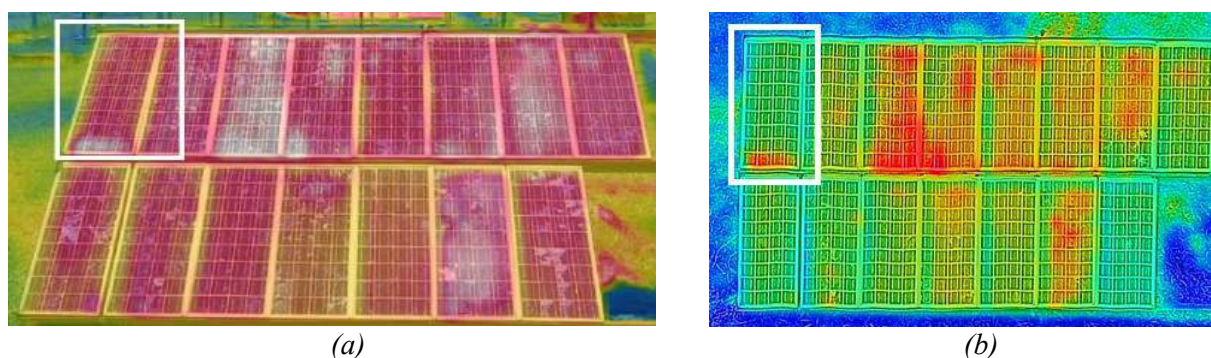


Figura 8: Comparação das imagens IV obtidas em solo e aéreo do arranjo Photowatt® em série, (a) termograma captado em solo do arranjo Photowatt® ligado em série, (b) termograma captado com o drone (destaque de módulo com quadrado na cor branca).

CONCLUSÕES

Este trabalho estabeleceu os fundamentos de uma metodologia para uma inspeção potencialmente rápida de arranjos fotovoltaicos (FV), utilizando-se uma câmera termográfica acoplada a um drone. Também foram feitas as medições elétricas, com o objetivo de determinar a taxa de degradação dos módulos testados.

A técnica termográfica foi aplicada em um lote de módulos FV, com tecnologia policristalina (Photowatt®). Esses módulos foram anteriormente utilizados em arranjos experimentais que operaram

durante 15 anos. A primeira conclusão com relação à medição dos módulos isolados foi que a emissividade da parte frontal dos módulos Photowatt® foi, em média, 0,93.

Conforme a categorização do IEA (JAHN, 2018) dos quinze módulos Photowatt® testados, nenhum apresentou gradiente de temperatura maior que 20°C (ponto quente), seis apresentaram um gradiente de temperatura entre 10-20°C (célula aquecida) e nove menores que 10°C (célula normal). Cabe ressaltar que esse lote de módulos foi filtrado anteriormente de um lote inicial total de trinta, dos quais quinze foram eliminados porque estavam inoperantes. No caso de módulos com ponto quente, a recomendação IEA é sua substituição e no caso de módulos com células aquecidas, manter um registro para acompanhamento nas próximas inspeções termográficas

Em relação às medições elétricas as seguintes conclusões foram obtidas:

- A resistência série sofreu uma notável elevação em todos os módulos policristalinos (Photowatt®) com, no mínimo, para 1,20 Ohms (+100%) e um máximo para 2,90 Ohms (+ 383,33%) e no mínimo 0,5 Ohms (nível padrão) e máximo 0,8 Ohms (+60%);
- fator de forma sofreu uma pequena variação de cerca de 10%;
- As perdas de potência nos arranjos em série apresentaram taxas de 11,73%.

A análise dos termogramas dos arranjos com quinze módulos Photowatt® ligados em série mostraram que tanto os que foram realizados no solo quanto os que foram com drone são totalmente consistentes e identificaram as mesmas células aquecidas nos diversos módulos dos arranjos. Em síntese, permitiu identificar um subconjunto de módulos mais gravemente afetados que no caso de uma inspeção preventiva seriam prioritariamente testados do ponto de vista elétrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) por disponibilizar os dados para o desenvolvimento deste estudo, ao técnico administrativo Rinaldo Oliveira de Melo e ao colega Marcelo Luiz Ferreira pelo grande apoio presencial nas atividades de campo.

REFERENCIAS

- AGHAEI, M. Unmanned Aerial Vehicles in Photovoltaic Systems Monitoring Applications. Conference: 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), 2014.
- BLISS, R. Drones reduce solar O&M costs by \$1,254 per MW. Disponível em: <<https://energycentral.com/c/cp/drones-reduce-solar-om-costs-1254-mw>>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- CEMIG. Revista P&D. CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.
- COSTA, A.L.C.; HIRASHIMA, S.Q.S.; FERREIRA, R.V. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. Ambiente Construído, v. 21, n. 4, 2021.
- DE OLIVEIRA, A. K. V. et al. Aerial infrared thermography of a CdTe utility-scale PV power plant. In: 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE, p. 1335-1340, 2019.
- JAHN, U.; HERZ, M.; KÖNTGES, M.; PARLEVLIET, D., PAGGI, M., TSANAKAS, I., STEIN, J.S., BERGER, K.A., RANTA, S., FRENCH, R.H., RICHTER, M., TANAHASHI, T. Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications. IEA PVPS, 2018.
- MÜHLEISEN, W. et al Scientific and economic comparison of outdoor characterisation methods for photovoltaic power plants. Renewable Energy, v. 134, p. 321-329, 2019.
- QUATER, P.B., GRIMACCIA, F., LEVA, S., MUSSETTA, M., AGHAEI, M. Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for cooperative inspection of PV plants. IEEE J. Photovoltaics 4, 1107–1113, 2014.
- REN21. Renewables 2022 Global Status Report: Global overview, 2022. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2022/chapters/chapter_01/chapter_01/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

TSANAKAS, J.A.; BOTSARIS, P.N. An infrared thermographic approach as a hot-spot detection tool for photovoltaic modules using image histogram and line profile analysis. *Int. J. Cond. Monit.* 2, p. 22-30, 2012.

METHODOLOGY FOR INSPECTING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS THROUGH THERMOGRAPHY

ABSTRACT To optimize the performance of a photovoltaic plant, it is necessary to know and pre-diagnose potential functional anomalies. Within this context, thermographic and electrical procedures for diagnosing PV modules and systems were tested and verified. The objective of this study was to develop an efficient methodology for fault inspection in PV systems based on the use of thermographic cameras. Arrangements were initially assembled where each module was tested electrically using the IxV curve tracer and thermographically using the thermographic camera. Arrangements were also assembled with these modules together, connected in series, for new tests using the camera attached to the drone. With these tests, we identified the influence of geometric and climatic factors and the need to properly calibrate the measuring equipment. We were also able to identify the variation of the electrical parameters of the modules and measure their degradation rate, in addition to identifying the hot spots of the system modules. The analysis of the thermograms that were performed both on the ground (terrestrial) and in drone overflights (aerial), showed that they are totally consistent and identified the same hot cells in the different modules of the arrays.

Keywords: distributed generation, solar energy, maintenance, thermography, drone, electrical characterization.

MODELAGEM TÉRMICA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CONDIÇÕES DE ALTA VARIABILIDADE

João Victor Furtado^{1,2}, Janis Galdino^{1,2}, Olga Vilela^{1,2}, Emerson Gomes^{1,2}

¹Centro de Energias Renováveis (CER) da Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE). Av. da Arquitetura s/n, Recife-PE, Brasil

²Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE). Av. Prof. Luiz Freire, s/n, Recife-PE, Brasil.

Tel. +55 81 2126-7326 (CER-UFPE) - E-mail: joao.furtado@ufpe.br

RESUMO: A simulação acurada dos sistemas fotovoltaicos realizada com dados de 1 minuto permite conhecer o comportamento dos sistemas em momentos de alta variabilidade. Os modelos térmicos buscam descrever o comportamento térmico dos módulos diante das condições ambientais para operação. O presente trabalho visa avaliar modelos bastante difundidos na literatura com dados de 1 min. Foram avaliados 9 modelos, incluindo o do PVsyst, Mattei e Sandia, usando as suas parametrizações originais e realizando um ajuste local posteriormente. Como forma de considerar a inércia térmica dos módulos fotovoltaicos, um modelo de média móvel foi proposto e comparado com o modelo térmico de melhor desempenho. Os dados observacionais de irradiância, velocidade do vento, temperatura ambiente e de operação dos módulos são provenientes do Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina, em Pernambuco-Brasil. Foram encontrados valores de RMSE entre 3,6 e 4,8 °C com os parâmetros originais dos modelos térmicos. Após reparametrização, modelos que utilizam a velocidade do vento como variável de entrada apresentaram ganhos importantes, por exemplo, o Mattei. O modelo Sandia apresentou ótimo desempenho com e sem ajuste local dos coeficientes. O modelo proposto neste trabalho apresentou RMSE de 2,2 °C, correspondendo a uma redução de 1,4 °C comparado ao melhor modelo ajustado.

Palavras chave: modelagem térmica dos módulos, comportamento térmico, média móvel, ajuste local, inércia térmica.

INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica (FV) tem passado por uma notável ascensão nos últimos anos em todo o globo (REN21, 2022). Com o forte crescimento do mercado FV, cresce a demanda pelo conhecimento de modelos acurados que simulam a operação das centrais fotovoltaicas com vistas à previsão e ao despacho de energia, como também, ao estudo do potencial das usinas fotovoltaicas (UFV). Um dos fatores que afetam fortemente o desempenho das UFV e dos módulos é o aquecimento dos módulos. Elevadas temperaturas de operação reduzem a tensão e aumentam ligeiramente a corrente, impactando negativamente a potência de saída dos módulos, e assim, a eficiência do sistema, sendo fundamental modelá-la corretamente.

Os modelos de temperatura dos módulos fotovoltaicos buscam determinar o comportamento térmico das células fotovoltaicas a partir de variáveis meteorológicas pertinentes, como a irradiância, temperatura ambiente e velocidade do vento, além também de parâmetros atrelados aos módulos fotovoltaicos que servem como entradas nos modelos. Devido à forte variabilidade da irradiância observada em dados de alta resolução temporal (5 min, 1 min ou ainda intervalos menores), diversos trabalhos passaram a dedicar esforços na modelagem da radiação (Yang, 2022; de Medeiros et al., 2022), térmica dos módulos fotovoltaicos (Oliveira et al., 2021) e inclusive na modelagem de sistemas fotovoltaicos (Hofmann e Seckmeyer, 2017) com base em dados de 1 min. Todo o interesse pelo dados sub-horários com destaque para 1 min vem devido à necessidade de se considerar os níveis energéticos

observados por essa resolução temporal na simulação dos sistemas fotovoltaicos (Medeiros, 2023) e para o correto dimensionamento dos inversores e das perdas por clipagem (Burger e Rüther, 2006). A grande maioria dos modelos térmicos são modelos de regime permanente que não consideram a inércia térmica existente. Alguns trabalhos propõem abordagens distintas para buscar descrever a inércia térmica dos módulos ao longo do tempo, em Li et al. (2020) um modelo térmico din  mico é adotado considerando os mecanismos de troca térmica entre o módulo e o entorno. Em Prilliman (2021) um modelo de média móvel é proposto considerando análises detalhadas de elementos finitos tridimensionais que calculam o efeito da velocidade do vento e da massa do módulo na temperatura do módulo. O maior problema dos modelos transientes abordados na literatura está na necessidade de par  metros ou informações que nem sempre estão disponíveis para simulação. Neste sentido, com o objetivo de avaliar os modelos existentes na literatura e comparar com uma metodologia que consiga descrever o comportamento térmico do módulo em dados instant  neos de alta resolução (1 min), o presente trabalho busca analisar o desempenho de modelos largamente utilizados na literatura e comparar a melhor deste grupo com uma modelo média móvel de fácil aplicação.

MODELOS TÉRMICOS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Vários modelos são utilizados na literatura para descrever a temperatura dos painéis, alguns conseguem descrever bem a temperatura dos módulos em resoluções temporais menores (horárias) para diferentes condições de instalação e climáticas locais. Alguns modelos são largamente utilizados na literatura como os modelos que serão avaliados nesse trabalho, sendo os modelos de Ross (1982), King (1997), King et al. (2004), Mattei et al. (2006), Skoplaki et al. (2008), Faiman (2008), PVSyst e o modelo NOCT, referente à Temperatura Nominal de Operação da Célula (em ingl  s, *Nominal Operating Cell Temperature* – NOCT).

O modelo NOCT é comumente utilizado como referência na estimativa da temperatura da célula sob condições operacionais. Especificada pela Comissão Eletrotécnica Internacional (do ingl  s, *International Electrotechnical Commission* – IEC) na IEC 61215:2005 (IEC, 2005), e apresentado na NBR 16274:2014 no procedimento de cálculo da energia injetada na rede, o modelo NOCT é amplamente utilizado na análise e dimensionamento de sistemas FV e é escrito conforme Equação 1.

$$T_{c,NOCT} = T_a + \frac{GTI}{G_{NOCT}}(T_{NOCT} - 20) \quad (1)$$

Onde GTI é a irradiância no plano inclinado (do ingl  s, *Global Tilted Irradiance*), T_a é a temperatura ambiente, T_{NOCT} e G_{NOCT} corresponde a temperatura e a irradiância em condições NOCT, sendo a primeira obtida na ficha técnica do módulo e a segunda equivalente a 800 W/m².

Ross (1976) desenvolveu um dos primeiros modelos de temperatura para células fotovoltaicas. O autor se baseia no balanço energético de um módulo fotovoltaico sem carga e leva em conta a energia absorvida pela célula, a energia perdida por condução com o *backsheet* do módulo, convecção e radiação. O modelo de Ross fornece uma compreensão abrangente do comportamento térmico das células FV através do coeficiente de condutância térmica global, k, também conhecido como k de Ross (Vilela et al., 2019). Esse indicador expressa o aquecimento dos módulos FV em relação à temperatura ambiente e que varia em função da irradiância incidente no plano do módulo fotovoltaico, sendo obtido pela razão $\Delta(T_c - T_a)/\Delta GTI$. O modelo é descrito a partir da Equação 2.

$$T_{c,ROSS} = T_a + k GTI \quad (2)$$

Alguns valores t  picos do k de Ross encontrados na literatura são apresentados na Tabela 1. Onde valores pequenos de k representam sistemas que conseguem trocar calor com o meio mais facilmente, assim não esquentando tanto e tendendo a performar melhor, enquanto que valores do par  metro k de Ross elevados, normalmente estão atrelados a Sistemas Integrados a Edificação, também conhecidos como BIPV (do ingl  s, *Building Integrated Photovoltaics*), que apresentam uma pequena c  mara de ar na parte traseira dos módulos, impedindo a troca térmica, e assim tendendo a operar com temperaturas superiores.

Tabela 1 – Valores do parâmetro k de Ross.

Condição de Instalação do módulo	Parâmetro de Ross (Km ² /W)
Sistema Flutuante	0,0183 – 0,0255 ^[1]
Instalada em solo (livre)	0,0208
Telhado Plano	0,0260
Telhado Inclinado, bem ventilado	0,0200
Telhado Inclinado, ventilação intermediária	0,0342
Telhado Inclinado, BIPV, baixa ventilação	0,0563
Telhado Inclinado, BIPV, elevada inclinação	0,0364 ^[2]
Integrado a Fachada, BIPV, módulo FV transparente	0,0455
Integrado a Fachada, BIPV, módulo opaco, câmara de ar pequena	0,0538
Integrado a Fachada, BIPV, módulo opaco, câmara de ar grande	0,0360 ^[2]

Fonte: Adaptado de Skoplaki et al. (2008), baseado nos dados de Nordmann e Clavadetscher (2003), ^[1] Galdino et al. (2021) e Vilela et al. (2019), e ^[2] Assoa et al. (2020) e Assoa et al. (2023).

Em Duffie e Beckman (1991), o comportamento térmico é estimado considerando uma série de parâmetros, como a temperatura da célula (T_{NOCT}), ambiente ($T_{a,NOCT}$) e a irradiância (G_{NOCT}) em condições normais de operação (NOCT), o coeficiente de temperatura (γ), a eficiência (η) e a temperatura em condições padrão de teste (T_{ref}), como também a eficiência ótica do módulo ($\tau\alpha$), representada pelo produto entre a transmitância do vidro (τ) e o coeficiente de absorvância da célula (α), adotado como 0,9 (Skoplaki et al., 2008).

$$T_{c,DB} = \frac{T_a + (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \left(\frac{GTI}{G_{NOCT}} \right) \left[1 - \frac{\eta}{\tau\alpha} (1 + \gamma T_{ref}) \right]}{1 + (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \left(\frac{GTI}{G_{NOCT}} \right) \frac{\gamma \eta}{(\tau\alpha)}} \quad (3)$$

O modelo de King (1997) ($T_{m,KING97}$) diferentemente de Ross (1976) e Duffie e Beckman (1991), inclui além da temperatura ambiente e irradiância, a influência que a velocidade do vento (V_w) possui na temperatura do módulo. Este modelo leva em consideração não mais a irradiância NOCT, mas a irradiância em STC, G_{STC} (1000 W/m²) e é escrito conforme a Equação 4.

$$T_{m,KING97} = T_a + \frac{GTI}{G_{STC}} [0.0712V_w^2 - 2.411V_w + 32.96] \quad (4)$$

King et al. (2004) expande o modelo anterior, incluindo uma análise unidimensional da condução térmica, considerando a influência da ventilação e da convecção na dissipação de calor da célula. Este modelo é amplamente utilizado para avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos e é empregado em softwares comerciais e em bibliotecas abertas como a *pvl* do *python*. Neste trabalho o modelo de King et al. (2004) apresentado nas Equação 5 e 6 será abordado como modelo térmico de Sandia. Esse modelo consiste em avaliar inicialmente a temperatura do módulo fotovoltaico (T_m) e, em seguida, com base na temperatura e nos aspectos construtivos do módulo e do tipo de montagem, estimar a temperatura da célula (T_c) a partir dos parâmetros a , b e ΔT demonstrados na Tabela 2.

$$T_m = GTI * \exp(a + b * V_w) + T_a \quad (5)$$

$$T_{c,SANDIA} = T_m + \frac{GTI}{G_{STC}} \Delta T \quad (6)$$

Tabela 2 – Parâmetros do modelo Sandia para diferentes tipos de módulo e aspectos construtivos.

Módulo	Instalação	a	b	ΔT (°C)
Vidro/célula/vidro	Sistema de Solo	-3,47	-0,0594	3
Vidro/célula/vidro	Telhado Integrado	-2,98	-0,0471	1
Vidro/célula/polímero	Sistema de Solo	-3,56	-0,0750	3
Vidro/célula/polímero	Isolado na parte posterior	-2,81	-0,0455	0

De maneira similar, em Mattei et al. (2006) a temperatura e a eficiência da célula são estimadas com base na temperatura ambiente, irradiância e ventilação existente. O modelo térmico de Mattei ($T_{c,MATTEI}$) foi obtido com base em medições minuto a minuto para módulos de silício policristalino, esse modelo considera o coeficiente de troca de calor (U_{PV}) variando em função da velocidade do vento, conforme Equação 7. O modelo é então obtido pela Equação 8.

$$U_{PV} = 26.6 + 2.3 V_w \quad (7)$$

$$T_{c,MATTEI} = \frac{U_{PV}T_a + GTI(\tau\alpha - \eta - \beta\eta T_{ref})}{U_{PV} - \beta\eta GTI} \quad (8)$$

A partir de validações experimentais realizadas para dados integrados a cada 5 minutos, o modelo de Faiman (2008) atribui um fator de perda térmica, representado pelos fatores U que se assemelha ao coeficiente de troca de calor de Mattei et al. (2006), sendo dividido em uma componente constante, denominada U_c , e um fator proporcional à velocidade do vento, U_v . Empregado com ligeiras modificações no software PVsyst, os fatores U dependem do tipo de montagem adotada no sistema fotovoltaico. Em sistemas com livre circulação de ar na parte posterior do módulo, notavelmente sistemas de solo, valores de $29 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $0 \text{ Wm}^{-3}\text{sK}^{-1}$ para respectivamente, U_c e U_v , são recomendados pela ferramenta quando na ausência de dados de velocidade do vento, montagens de sistemas completamente integrados a edificação, onde somente um lado contribui com trocas térmicas por convecção e casos intermediários, que existe uma câmara de ar na parte posterior dos módulos também recebem sugestões de valores para U_c e U_v , sendo respectivamente valores de $15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, $0 \text{ Wm}^{-3}\text{sK}^{-1}$ e $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, $0 \text{ Wm}^{-3}\text{sK}^{-1}$ (PVsyst, 2023). O autor Faiman (2008) encontrou valores de 25 e 6,84 para ambos coeficientes com base em diferentes tipos de módulos. A Equação 9 e 10 apresentam os modelos PVsyst ($T_{c,PVsyst}$) e de Faiman ($T_{c,FAIMAN}$).

$$T_{c,PVsyst} = T_a + \frac{\alpha GTI(1 + \eta)}{U_c + U_v V_w} \quad (9)$$

$$T_{c,FAIMAN} = T_a + \frac{GTI}{U_c + U_v V_w} \quad (10)$$

Semelhantemente à equação proposta por Duffie e Beckman (1991), Skoplaki et al. (2008) desprezam a troca de calor por radiação considerada nos fatores U e acrescentam a razão dos coeficientes convectivos no cálculo da temperatura da célula. Esse termo corresponde a $h_{w,NOCT}/h_w$, onde h_w corresponde à convecção forçada realizada pela ação do vento e é escrita conforme Equação 11, e $h_{w,NOCT}$ é obtido pela equação a partir da velocidade do vento adotada na condição NOCT (1 m/s), $h_{w,NOCT}$ resultando no valor de $10,91 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Skoplaki et al., 2008). O comportamento térmico por $T_{c,SKOPLAKI}$ é descrito sob a forma de:

$$h_w = 8.91 + 2.0 V_w \quad (11)$$

$$T_{c,SKOPLAKI} = \frac{T_a + \left(\frac{GTI}{G_{NOCT}}\right) \frac{h_{w,NOCT}}{h_w} (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[1 - \frac{\eta}{\tau\alpha} (1 + \beta T_{ref})\right]}{1 - \frac{\beta\eta}{(\tau\alpha)} \left(\frac{GTI}{G_{NOCT}}\right) \frac{h_{w,NOCT}}{h_w} (T_{NOCT} - T_{a,NOCT})} \quad (12)$$

METODOLOGIA

As medições da temperatura da parte posterior do módulo (*backsheet*) (T_m ou T_b , índice b de *backsheet*) tendem a ser inferiores à da célula fotovoltaica (T_c), a diferença entre ambas temperaturas depende dos materiais utilizados no módulo e do nível de irradiância (Li et al., 2020). A IEC 61274-1:2021 *Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring* indica que essas diferenças são tipicamente de 1 a 3 °C dependendo da construção do módulo e que essas diferenças devem ser estimadas em função da irradiância, utilizando a condutividade térmica dos materiais do módulo, mas não especifica qual método empregar (Santiago et al., 2018).

Uma vez que as medições em campo são realizadas na parte posterior dos módulos, será utilizada a metodologia adotada no trabalho de Akhsassi et al. (2018), onde a temperatura da célula calculada pelos

modelos é transformada em temperatura do módulo pela relação apresentada em Sandia (Equação 6, com $\Delta T=3$). Todos os modelos abordados na seção anterior necessitam corrigir a temperatura da célula para a temperatura do módulo, exceto os modelos Sandia, King97, Ross e Faiman, os dois primeiros estimam a temperatura do módulo (*backsheet*) e os dois últimos consideram que a temperatura da célula e do módulo são equivalentes.

$$T_m = T_c - \frac{GTI}{G_{STC}} \Delta T \quad (13)$$

As temperaturas calculadas e medidas são validadas para as condições locais considerando três diferentes etapas. A primeira etapa consiste em adotar os coeficientes dos modelos originais, conforme são adotados na literatura, em seguida, na segunda etapa os coeficientes térmicos são ajustados para Petrolina considerando as características locais. Por fim, um modelo de média móvel baseado no modelo de Duffie e Beckmann (1991) que possui irradiância, temperatura ambiente e dados do módulo como entrada é proposto e comparado com o melhor modelo ajustado. A metodologia geral do presente trabalho é apresentada então na Figura 1.

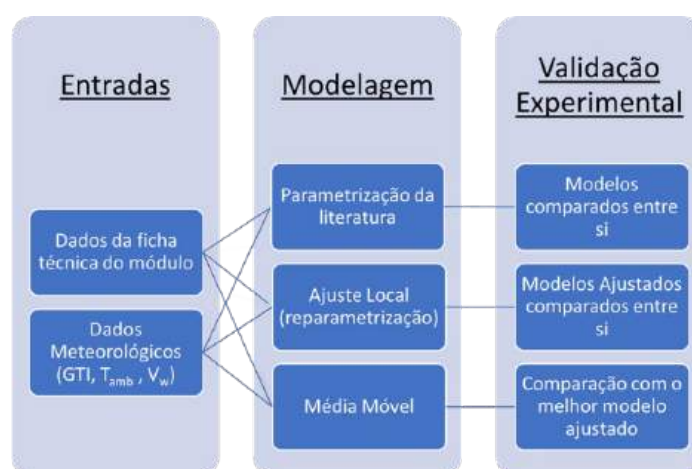


Figura 1 - Metodologia geral do presente trabalho. Etapa I: validação dos modelos térmicos com parametrização original da literatura. Etapa II: Comparação dos modelos com Ajuste Local dos coeficientes. Etapa III: Proposição de um modelo média móvel.

O modelo média móvel simples de Duffie e Beckmann (MM_DB) é obtido pela média dos valores calculados pelo modelo de Duffie e Beckmann ao longo de um período definido, conforme Equação 14.

$$T_{m,MMDB} = \frac{T_{m,DB_1} + T_{m,DB_2} \dots + T_{m,DB_n}}{n} \quad (14)$$

Onde n corresponde ao período da média móvel adotada, no presente estudo foi adotado 10 períodos (equivalente a 10 minutos) visando suavizar a modelagem. Nos minutos iniciais em que a média móvel não apresentaria dados, o modelo MM_DB considera a temperatura instantânea calculada por $T_{m,DB}$ para completar a série temporal.

Base de dados

A base de dados utilizada corresponde às medições realizadas a cada segunda e registradas a cada 1 minuto de 03 de dezembro de 2021 a 23 de dezembro de 2021. Os dados medidos são referentes a irradiância global inclinada (GTI) no plano dos módulos fotovoltaicos ($15^\circ N$), a temperatura ambiente, velocidade do vento e também aos dados térmicos medidos na face posterior de diferentes módulos monofaciais de uma usina de 2,5 MWp instalada no Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina (CRESP), em Pernambuco (Ramos et al., 2022). O clima local é o semiárido quente (tipo BSh na classificação Köppen-Geiger), com latitude de $9,11^\circ S$, longitude de $40,44^\circ O$ e altitude de 385 m em relação ao nível do mar.

A irradiância global inclinada (GTI) no plano do arranjo FV é medida a partir do piranômetro EKO, modelo MS-40 (classe A), com faixas de medição de 0 a 2000 W/m², faixa espectral de 285 nm a 3000

nm com tempo de resposta inferior a 18 s. Os dados térmicos são medidos com os sensores LM35 que foram previamente calibrados com um PT100. O sensor é acoplado na parte central da célula, ficando em contato com o *backsheet* do módulo, o acoplamento é realizado com pasta térmica e fita isolante a fim de reduzir a troca térmica convectiva do sensor com o ambiente e otimizar a medição da temperatura do módulo.

Quatro sensores foram acoplados em células de diferentes módulos fotovoltaicos. Uma análise termográfica foi realizada para garantir a boa distribuição da temperatura e boa condição das células antes do experimento. A Figura 2 apresenta os módulos de análise, onde somente as temperaturas dos sensores T1, T2 e T3 são consideradas (em verde), haja vista que T4 queimou ao longo da campanha de medição (em vermelho). A temperatura adotada corresponde à média das temperaturas dos sensores T1, T2 e T3.

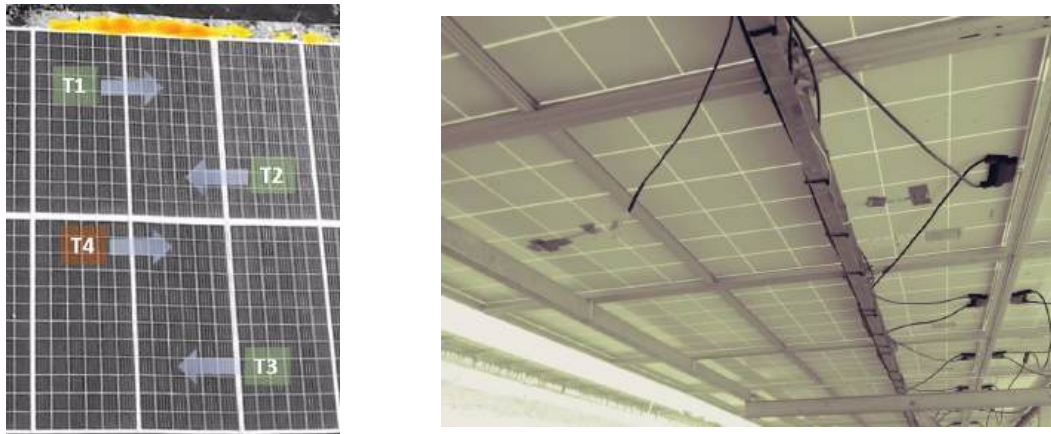


Figura 2 - Localização dos sensores térmicos T1, T2, T3 e T4 acoplados no *backsheet* dos módulos.

Para fins de modelagem do comportamento térmico dos módulos, a velocidade do vento medida pelo anemômetro a 10 metros de altura é corrigida para a altura dos módulos fotovoltaicos seguindo a lei logarítmica, que relaciona a velocidade do vento para diferentes alturas a partir da rugosidade do ambiente (Prilliman et al., 2020). A relação logarítmica é apresentada na Equação 15.

$$v(z) = v(z_r) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (15)$$

Onde z_r é a altura onde é realizada a medição, z é a altura nominal dos módulos fotovoltaicos, $v(x)$ é a velocidade do vento na altura x e z_0 é a rugosidade da superfície. No presente trabalho foram considerados os valores de $z_r = 10$ m, $z = 1,5$ m e z_0 foi considerado 0,001 m baseado nas classes de rugosidade do atlas eólico e solar de Pernambuco (“Atlas Eólico e Solar de Pernambuco”, [s.d.]).

Validação experimental dos modelos térmicos

As temperaturas dos módulos fotovoltaicos modeladas foram validadas estatisticamente com base na média da temperatura dos módulos em operação na central fotovoltaica. Os parâmetros estatísticos considerados são o erro médio absoluto (nMAE), o erro médio (nMBE), a raiz do erro quadrático médio (nRMSE) normalizados e o coeficiente de determinação (R^2). Para que o modelo seja considerado acurado é desejado que os mesmos apresentem valores próximos a 0 (zero) para os três primeiros indicadores e que apresentem valores próximos a 1 (um) para o R^2 .

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Parametrização da literatura

A Figura 3 apresenta as dispersões das simulações obtidas pelos modelos frente à medição térmica, destacando o estatístico coeficiente de determinação (R^2) de cada modelo por gráfico. A reta de ajuste de cada modelo também é apresentada.

(a)

(b)

(c)

(d)

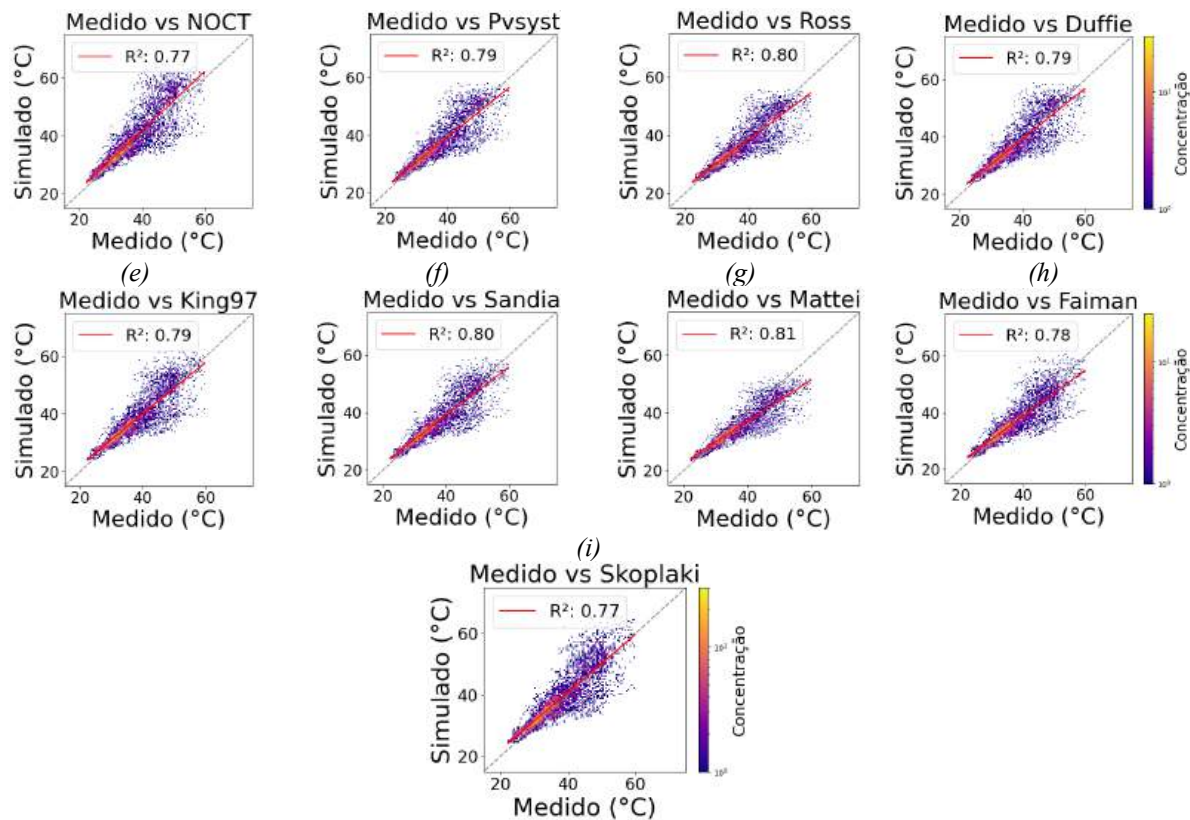


Figura 3: Dispersões dos dados simulados vs medidos dos modelos térmicos a) NOCT, b) PVsyst, c) Ross, d) Duffie, e) King97, f) Sandia, g) Mattei, h) Faiman, i) Skoplaki.

É possível observar na Figura 3 que alguns modelos apresentam elevado R^2 entretanto a linha de ajuste em vermelho, não está alinhada com a reta identidade ($y=x$, em cinza), demonstrando que a dispersão dos pontos tende a subestimar a medição, como é o caso do modelo Mattei que possui o maior R^2 entretanto a reta vermelha não alinhada com a reta cinza. Outros modelos apresentam maior alinhamento da linha de ajuste (vermelha) com a reta identidade, entretanto os dados estão bem dispersos apresentando menor R^2 , como é o caso do modelo NOCT.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos estatísticos de cada modelo comparando aos valores calculados com parametrização da literatura. Na tabela, estão destacados em verde os melhores modelos para cada estatístico e em vermelho os piores resultados para cada um dos estatísticos.

Tabela 3: Estatísticos dos modelos térmicos com parametrização da literatura.

MODELOS	MAE (°C)	nMAE (%)	MBE (°C)	nMBE (%)*	RMSE (°C)	nRMSE (%)*	R^2 (-)
Duffie	2,51	6,66	-0,33	-0,87	3,77	10,04	0,786
Faiman	2,56	6,82	-0,74	-1,96	3,8	10,1	0,781
King97	2,56	6,80	0,32	0,86	3,79	10,08	0,789
Mattei	2,85	7,58	-2,2	-5,84	4,16	11,07	0,811
NOCT	3,43	9,13	1,88	4,99	4,82	12,81	0,769
PVsyst	2,48	6,59	-0,35	-0,93	3,73	9,93	0,788
Ross	2,51	6,67	-1,15	-3,06	3,77	10,02	0,795
Sandia	2,39	6,36	-0,52	-1,37	3,64	9,67	0,797
Skoplaki	2,97	7,89	1,04	2,76	4,27	11,35	0,767

*: Valor médio medido da T_m para os cálculos de nMBE e nRMSE corresponde a 37,61 °C.

Pela Tabela 3 é possível observar que os erros (MBE) variam entre aproximadamente -2,2 °C e 1,88 °C, com RMSE entre 3,64 e 4,82 °C. Em Oliveira et al. (2021) análises também na resolução de 1 min demonstram valores de RMSE entre 3,1 °C e 11,3 °C a depender das localidades no globo. Alguns lugares como no Reino Unido, o RMSE do modelo de Ross, que possui maior simplicidade na aplicação, e do Faiman, que considera as trocas convectivas, foram de respectivamente, 3,6 °C e 3,9 °C, próximos aos obtidos na presente pesquisa. Os autores ainda obtiveram resultados próximos entre ambos modelos

em lugares de baixa latitude como no Brasil em Brotas de Macaúbas (12,31° S) e Cingapura (1,28° N) quando avaliando dados de 1-min.

Ainda quanto a Tabela 3 é possível observar que o modelo NOCT, um dos mais utilizados na literatura e adotado em normas, sobrestima o comportamento térmico dos módulos em 4,99%, essa sobrestimativa também é observada em Li et al. (2020). Os modelos Ross, PVsyst e Duffie são modelos que não consideram a velocidade do vento nas análises, e mesmo não considerando a troca convectiva forçada, apresentaram bons resultados. Em Santiago et al. (2018) foi observado que os modelos que usam a velocidade do vento precisam ter as expressões de transferência térmica global determinados experimentalmente para a localidade e condições da instalação, uma vez ajustados é possível alcançar resultados otimizados.

Reparametrização dos modelos (Ajuste Local)

O ajuste dos coeficientes dos modelos foi realizado para os módulos instalados em estrutura fixa com inclinação de 15° N em Petrolina, a técnica empregada foi o *curve fit* em *python*, onde os novos coeficientes são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes originais dos modelos e ajustado localmente para dados de 1 min.

	Ross	PVsyst	Skoplaki	Faiman	King97	Mattei	Sandia	
<u>Original</u>	<i>k</i>	0,0208	U _c 29	h _c 8,91	U _c 25	a 0,0712		
			U _v 0	h _v 2	U _v 6,84	b -2,411	h _c 26,6	a -3,56
						c 32,96	h _v 2,3	b -0,076
<u>Ajustado</u>	<i>k</i>	0,0221	U _c 36,71	h _c 15,50	U _c 36,78	a 0,0361		
			U _v 0	h _v 1,24	U _v 1,78	b -1,429	h _c 25,73	a -3,60
						c 27,49	h _v 2,0	b -0,063

Os ajustes são realizados em todos os modelos exceto Duffie e NOCT que não contam com coeficientes convectivos que podem ser parametrizados. Após os ajustes, é observado na Tabela 5 que os modelos que consideram a velocidade do vento apresentaram ganho na simulação do comportamento térmico dos módulos.

Tabela 5: Estatísticos dos modelos térmicos ajustados com base nas características locais.

MODELOS	MAE (°C)	nMAE (%)	MBE (°C)	nMBE (%)*	RMSE (°C)	nRMSE (%)*	R ² (-)
Duffie	2,51	6,66	-0,33	-0,87	3,77	10,04	0,786
Faiman	2,39	6,34	-0,53	-1,41	3,63	9,66	0,797
King97	2,39	6,34	-0,53	-1,42	3,63	9,66	0,797
Mattei	2,38	6,32	-0,49	-1,30	3,61	9,60	0,798
NOCT	3,43	9,13	1,88	4,99	4,82	12,81	0,769
PVsyst	2,46	6,54	-0,64	-1,69	3,72	9,88	0,791
Ross	2,46	6,54	-0,62	-1,65	3,72	9,88	0,790
Sandia	2,39	6,34	-0,54	-1,42	3,63	9,66	0,797
Skoplaki	2,39	6,36	-0,56	-1,49	3,65	9,70	0,797

*: Valor médio medido da T_m para os cálculos de nMBE e nRMSE corresponde a 37,61 °C.

Com o ajuste realizado, é possível observar que o modelo Sandia com e sem Ajuste local apresentou bons resultados para a localidade. Os modelos Faiman, King97, Mattei e Sandia apresentaram os melhores desempenhos globais, e alguns modelos que utilizam a velocidade do vento como variável de entrada apresentaram ganhos importantes com o ajuste local. Para o modelo Mattei, que tinha apresentado elevado coeficiente de determinação inicialmente, entretanto baixo desempenho global com maior subestimativa das temperaturas e elevado nRMSE, após ajuste, obteve melhora do nRMSE de 1,47%, saindo de 11,07% para 9,6% e do nMBE saindo de -2,2°C para -0,49°C.

De maneira geral, é possível observar após reparametrização dos modelos que os modelos que consideram a velocidade do vento tendem a apresentar resultados ligeiramente melhores. Entretanto não apresentam ganhos muito expressivos, por exemplo o modelo de Ross é um modelo simples e que consegue apresentar resultados satisfatórios quanto a estimativa do comportamento térmico. Essa ligeira diferença se deve ao pequeno impacto que a V_w possui na modelagem da temperatura, apesar de pequeno, quando disponível deve ser levada em consideração nos cálculos da temperatura dos módulos (Akshassi et al., 2018). Além disso, a velocidade do vento na altura dos módulos para a localidade de

Petrolina e período avaliado não é tão expressiva (<7 m/s), o que corrobora com a ligeira melhora na modelagem.

A notar ainda que todos esses modelos são considerados modelos de regime permanente (Prilliman et al., 2022), pois não levam em consideração a inércia térmica dos módulos, como pode ser observado na Figura 4, onde momentos entre 10:45 e 11:15 de um dia de céu variável ocorrem picos nas temperaturas modeladas e logo em seguida, a temperatura simulada cai rapidamente. Essa grande variação se dá pelas variações abruptas da irradiância, devido à passagem de nuvens. Ao mesmo tempo, pode-se observar que a temperatura medida tem comportamento suavizado, resfriando aos poucos, conforme pode ser observado na curva azul da Figura 4.

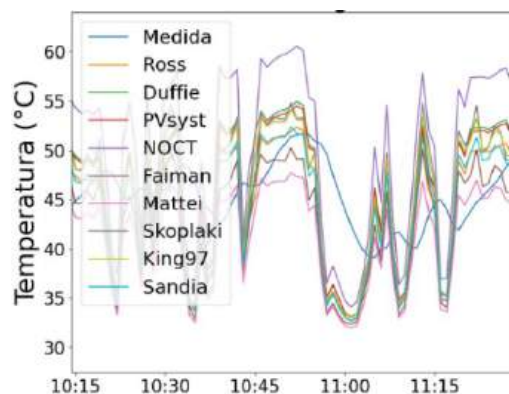


Figura 4 - Comportamento térmico dos módulos simulado pelos modelos e medido (curva em azul).

Modelo Média Móvel de Duffie e Beckmann

Visando amenizar essa elevada variabilidade foi aplicado um modelo que consiste na média móvel do modelo de Duffie e Beckmann (DB). Esse modelo consiste na média móvel de 10 min de DB, onde para os instantes iniciais em que a média móvel ainda não teria capturado a janela de 10 minutos do modelo DB, o modelo da média móvel é preenchido com os valores instantâneos do modelo de Duffie e Beckman. Esse modelo foi selecionado devido à facilidade de aplicação do mesmo (varia em função de T_{amb} e G_{TI}) e possui bons resultados do *bias* (MBE e nMBE). O conceito de média móvel é também empregado em Prilliman et al. (2022) sendo utilizado uma média móvel ponderada. Os ganhos da presente modelagem podem ser observados na Figura 5, ao comparar o melhor modelo reparametrizado, o modelo Mattei Ajustado com o modelo média móvel de Duffie e Beckman (MM_DB).

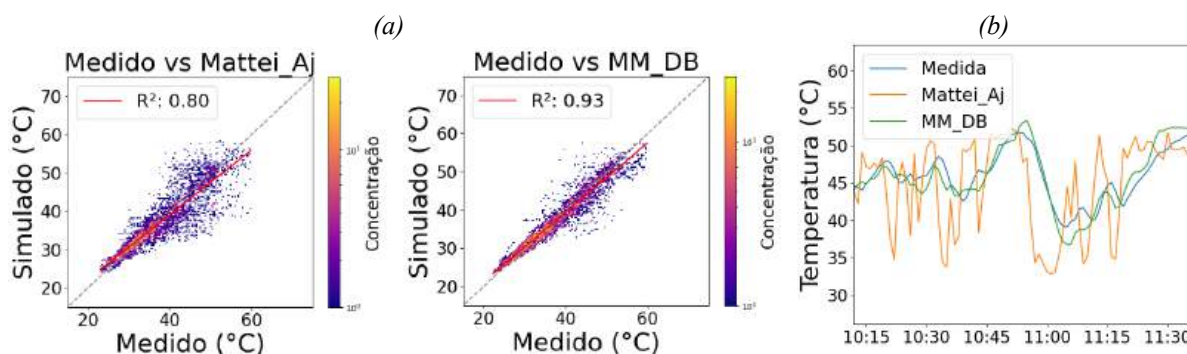


Figura 5 – a) Simulado vs medido para o melhor modelo ajustado (Mattei_Aj) e a Média Móvel de Duffie e Beckman. b) Variação temporal dos modelos e da medição com base em dados de 1 min.

A maior concentração de dados próximos a reta identidade (reta de cor cinza) demonstra que os dados simulados pelo modelo MM_DB permitem uma maior descrição do comportamento térmico dos módulos fotovoltaicos, o que é confirmado na Figura 6.b a partir das séries temporais avaliadas. O comportamento suavizado do modelo MM_DB acarreta no elevado R^2 (0,93), no RMSE de 2,15 °C (nRMSE de 5,72%), MBE de -0,37 °C (nMBE de -0,97%). Frente ao modelo Mattei ajustado os ganhos nessa abordagem permitem a redução de 1,4 °C no RMSE (3,61 °C para 2,15 °C) e aumento de 0,13 no R^2 (0,80 para 0,93). Apesar da metodologia ser diferente, em Prilliman et al. (2022) os resultados obtidos

com a média móvel do modelo proposto pelos autores acarretam no ganho de até 2,40 °C no RMSE para a localidade de Orlando, já em Albuquerque os ganhos no RMSE foram de 1,10 °C, próximo ao valor aqui obtido.

CONCLUSÕES

No presente trabalho o comportamento térmico dos módulos foi estimado a partir de diferentes modelos térmicos comumente adotados na literatura e ainda, um modelo térmico foi proposto visando otimizar a modelagem térmica dos módulos. Ao empregar nove modelos utilizando a parametrização da literatura, observou-se que os modelos Duffie e Beckman, PVsyst, Ross e Sandia apresentaram os melhores desempenhos. Na segunda etapa, após ajustar os coeficientes para as condições de instalação e climáticas de Petrolina, foi observado que o modelo Mattei, King97, Sandia e Faiman apresentaram os melhores resultados. O modelo Sandia apresentou ótimo desempenho com e sem ajuste local dos coeficientes, demonstrando ótima descrição do comportamento térmico. O desempenho superior dos modelos com ajuste local na segunda etapa se deve ao fato de que esses modelos consideram a velocidade do vento na troca térmica, onde os resultados ligeiramente superiores se devem a baixa velocidade do vento existente na altura dos módulos. Por fim, um modelo térmico foi proposto com o objetivo de descrever a inércia térmica dos módulos. O modelo média móvel de Duffie e Beckmann (MM_DB) apresentou o melhor desempenho dentre as condições avaliadas, apresentando ganho de 1,4 °C no RMSE e 3,9% em termos normalizados, saindo de 9,6% com Mattei com coeficientes ajustados para 5,7% com o modelo média móvel de Duffie e Beckmann. Como perspectivas futuras, propõe-se analisar o acoplamento da modelagem térmica com a modelagem elétrica para diferentes localidades, utilizando também outros modelos de regime permanente como entrada na modelagem de média móvel, bem como, modelos específicos de regime transiente, considerando a inércia térmica do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por meio do projeto 23076.009704/2020-56 no âmbito do Programa de P&D ANEEL, como também ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio aos bolsistas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN.

REFERENCIAS

- Akhsassi, M., El Fathi, A., Erraissi, N., Aarich, N., Bennouna, A., Raoufi, M., & Outzourhit, A. (2018). Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 271-279.
- Assoa, Y. B., Valencia-Caballero, D., Rico, E., Del Caño, T., E., Furtado, J. V. (2023). Performance of a large size photovoltaic module for façade integration. *Renewable Energy*, 211, 903-917.
- Assoa, Y.B., De Medeiros, J.V.F.F. E Thony, P. (2020). Impact of Configurations on the Performance Prediction of Building Integrated Photovoltaic Modules. In *EU PVSEC 2020, 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, p. 1937-1940.
- Atlas Eólico e Solar de Pernambuco. Disponível em:
<<http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/chapter/climatologia.html?Uso%20do%20Solo%20e%20Rugosidade>>. Acesso em: 15 maio. 2023.
- Burger, B. & Rüther, R. (2006). Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. *Solar Energy*, v. 80, no 1, p. 32-45.
- de Medeiros, J. V. F., Barboza, L. E., Miranda, D. R., Vilela, O. C., Gomes, E. T., & Salazar, G. (2022). Modelos de separação de GHI: validação para dados de 1-min e análise do impacto na geração de sistemas fotovoltaicos em baixa latitude. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 26, 291-302.
- Duffie J.A., Beckman W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes* 2nd edition, Wiley, New York, NY.

- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013) Solar engineering of thermal processes, 4th edition, Wiley, New York, NY.
- Faiman, D. (2008). Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 16, n. 4, p. 307–315.
- Galdino, J.B., Barcelar, T. S., Miranda, D., Petribú, L., Vilela, O.C. & Barbosa, E. M. (2021). Comportamento térmico de painéis solares em diferentes formas de montagens de uma usina fotovoltaica flutuante. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 8, p. 78-86.
- Hofmann, M., & Seckmeyer, G. (2017). Influence of various irradiance models and their combination on simulation results of photovoltaic systems. *Energies*, 10(10), 1495.
- IEC. IEC 61215:2005. (2005). Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules—Design qualification and type approval.
- King, D. L.; Boyson, W. E.; Kratochvil, J. A. (2004). Photovoltaic Array Performance Model. . United States.
- King D.L. (1997). Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions. In: *Proceedings of the NREL/SNL photovoltaic program review meeting*, Lakewood, CO, p. 1–22.
- Li, C., Spataru, S. V., Zhang, K., Yang, Y., & Wei, H. 2020. A Multi-State Dynamic Thermal Model for Accurate Photovoltaic Cell Temperature Estimation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, p. 1–9.
- Mattei, M., Notton, G., Cristofari, C., Muselli, M., & Poggi, P. (2006). Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable Energy*, v. 31, n. 4, p. 553–567.
- Medeiros, J.V.F.F. (2023). Avaliação de modelos utilizados na estimativa da geração de energia de uma usina fotovoltaica localizada no semiárido brasileiro. *Dissertação de Mestrado, CER, UFPE, Recife*.
- Nordmann, T., & Clavadetscher, L. (2003). Understanding temperature effects on PV system performance. In *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of (Vol. 3, pp. 2243-2246)*. IEEE.
- Oliveira, A. K. V., Braga, M., Oh, S., Dittmann, S., Gottschalg, R., Rodríguez-Gallegos, C. D., Reindl, T., Ettlbi, K., Betts, T., Burnham, L., E Rüther, R. (2021). Analysis of Temperature Inertia of PV Modules Using Different Temperature Estimation Models. *38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, p. 1269–1274.
- Prilliman, M., Stein, J. S., Riley, D., & Tamizhmani, G. (2020) Transient weighted moving average model of photovoltaic module back-surface temperature. In *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (pp. 0490-0497)*. IEEE.
- PVsyst (2023). Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/help>>. Acesso em: 20 de abril de 2023.
- Ramos, M. R., de Medeiros, J. V. F. F., Miranda, D., Vilela, O. C., Pereira, A. C., Jatoba, E. B., & de Melo Filho, J. B. (2022). Avaliação de desempenho da planta fotovoltaica de 2, 5 mwp do cresp com parametrização do software PVsyst. In *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS (pp. 1-9)*.
- REN21 (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf>. Acesso em: 21 de maio de 2023.
- Ross, R. G. (1976). Interface design considerations for terrestrial solar cell modules. In: *12th Photovoltaic specialists conference*. p. 801-806
- Santiago, I., Trillo-Montero, D., Moreno-García, I. M., Pallarés-López, V., & Luna-Rodríguez, J. J. (2018). Modeling of photovoltaic cell temperature losses: A review and a practice case in South Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 70-89.
- Skoplaki, E., Boudouvis, A. G. & E Palyvos, J. A. (2008) A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 92, n. 1, p. 1393–1402.
- Vilela, O. D. C., Bacelar, T. S., Fraidenraich, N., & Barbosa, E. M. D. S. (2019). Previsão da temperatura e do desempenho do gerador fotovoltaico flutuante a partir de suas características elétricas medidas em reais condições ambientais. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 23, 21-28.
- Yang, D. (2022). Estimating 1-min beam and diffuse irradiance from the global irradiance: A review and an extensive worldwide comparison of latest separation models at 126 stations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 159, p. 112195.

THERMAL MODELING OF PHOTOVOLTAIC MODULES UNDER HIGH VARIABILITY CONDITIONS

ABSTRACT Accurate simulation of photovoltaic systems using 1-minute data allows to know the behavior of the systems in moments of high variability. Thermal models seek to describe the thermal behavior of modules given environmental operating conditions. This study aims to evaluate models widely disseminated in the literature with 1-min data. Nine models were evaluated, including PVsyst, Mattei, and Sandia, using their original parameterizations and performing a local adjustment. A moving average model was proposed to consider the thermal inertia of photovoltaic modules and compare it with the best-performing thermal model. The observational data of irradiation, wind speed, ambient temperature, and module operation are from the Solar Energy Reference Center of Petrolina in Pernambuco-Brazil. RMSE values between 3.6 and 4.8 °C were found with the original parameters of the thermal models. After reparameterization, models using wind speed as an input variable presented significant gains, such as the Mattei model. Sandia model performed very well with and without local adjustment of the coefficients. The model proposed here presented an RMSE of 2.2 °C, corresponding to a reduction of 1.4 °C compared to the best-adjusted model.

Keywords: thermal modeling of modules, thermal behavior, moving average, local adjustment, thermal inertia

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA RESIDENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DURANTE UN AÑO DE OPERACIÓN

Julio C. Durán^{1,2}, Elena M. Godfrin¹, Alejandro Krautner¹, Ignacio Tuxen-Bang²

¹Departamento Energía Solar, Centro Atómico Constituyentes, CNEA

²Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín (UNSAM)

Av. General Paz 1499, (B1650) San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Tel. +54 11 67727132 – e-mail: duan@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN: Se analiza el funcionamiento durante un año de operación de un sistema de almacenamiento de energía compuesto por un inversor bidireccional, una batería de Li-ion y generación fotovoltaica, instalado en una vivienda unifamiliar en la Ciudad de Buenos Aires. La vivienda tiene un consumo eléctrico de aproximadamente 4.000 kWh/año y cuenta con generación fotovoltaica con una potencia total de 3 kW_p. Considerando el modelo de facturación neta establecido por la Ley 27.424 y a fin de evaluar los ahorros en las facturas del servicio eléctrico, se estudió la variación del autoconsumo y la inyección de excedentes con el agregado de almacenamiento a sistemas fotovoltaicos. Se estimó el ahorro anual en el servicio eléctrico utilizando el Cuadro Tarifario Nivel 1 (altos ingresos) de la distribuidora EDENOR, vigente a partir del 1/08/2023. Dados los altos costos de los sistemas fotovoltaicos en el país, el ahorro anual, incluso con la tarifa Nivel 1 prácticamente no subsidiada, es aún insuficiente para recuperar la inversión inicial en un plazo razonable. En el contexto actual, el logro de un cambio de escala en la instalación por parte de clientes residenciales de sistemas como el descripto requiere la implementación de los beneficios previstos en la Ley 27.424.

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, generación distribuida, almacenamiento, autoconsumo, tarifa eléctrica, ahorros.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de energía eléctrica a gran escala juega un papel relevante en el escenario de emisiones netas cero para el año 2050 (IEA, 2022), proporcionando importantes servicios que contribuyen a facilitar la inserción de energías renovables, reducir picos de demanda, disminuir pérdidas de transporte, moderar la necesidad de inversión en infraestructura y reducir los requerimientos de sistemas de reserva (*back-up*) basados en combustibles fósiles. Si bien el almacenamiento de energía eléctrica puede estar conectado en las áreas de transporte o de distribución, el almacenamiento ubicado cerca del consumo es el que más servicios puede ofrecer al sistema eléctrico en general (Fitzgerald et al., 2015). La evaluación del uso de sistemas de almacenamiento debe tener en cuenta también otros factores como ser pérdidas de energía en los procesos de acumulación y despacho, costos de operación y mantenimiento, y posibilidades de reciclado al final de su vida útil.

El almacenamiento en plantas hidroeléctricas de bombeo sigue siendo la tecnología de almacenamiento a escala de red más implementada en la actualidad, representando en el año 2020, con 8500 GWh, más del 90 % del almacenamiento total de electricidad a nivel mundial (IEA, 2022). Aunque actualmente el almacenamiento en baterías es mucho más pequeño que el hidroeléctrico, se prevé que las baterías representen la mayor parte del crecimiento del almacenamiento en todo el mundo durante los próximos años.

Existen en el mercado varias tecnologías aptas para el almacenamiento distribuido, tales como las baterías de plomo-ácido o de níquel-cadmio, o las más modernas baterías de flujo y los supercapacitores, algunas de las cuales tienen un menor costo nivelado de almacenamiento (Smith et al., 2019) que las baterías de Li-ion. Sin embargo, la tecnología que acapara ampliamente el mercado en el sistema eléctrico es la de Li-ion, con un 98 % (Fortune Business Insights, 2022), debido principalmente al mercado de baterías para la industria automotriz que es 10 veces mayor que el asociado a sistemas de generación distribuida. Ambos mercados han contribuido, en mayor o menor medida, a reducir el precio del pack de baterías de Li-ion (celdas más sistema de gestión y control BMS, *Battery Management System*) a la quinta parte en tan solo 8 años (Colthorpe, 2021).

El uso de sistemas de almacenamiento de energía (ESS, *Energy Storage System*) en instalaciones de usuarios del sistema eléctrico con sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a la red interna permite aumentar el autoconsumo de la energía generada, minimizando la inyección de excedentes a la red pública. Esto es particularmente importante para usuarios residenciales donde, típicamente, menos del 50 % de la energía generada se consume en la vivienda debido al desfase entre la generación y el consumo (ver, por ejemplo, Godfrin et al, 2022).

Un sistema de almacenamiento de energía está compuesto básicamente por un inversor/cargador bidireccional, que convierte corriente continua en alterna o viceversa, un dispositivo para gestión de la energía y un banco de baterías recargables (Victron, 2022). Puede funcionar conectado a la red eléctrica pública o en forma aislada, actuando como generador de corriente alterna. Existen en el mercado sistemas de almacenamiento en baja tensión, típicamente 48 V, y en alta tensión (ver, por ejemplo, SMA, 2017). Los inversores bidireccionales que trabajan en baja tensión son los que se utilizan habitualmente para aplicaciones de baja potencia como las residenciales y, además, son prácticamente los únicos que se consiguen en el mercado argentino.

El ESS puede combinarse con generadores FV en diferentes configuraciones (ver Figura 1):

- Módulos FV conectados al inversor bidireccional del lado de corriente continua, a través de un regulador de tensión (acoplamiento en corriente continua).
- Sistema FV con inversor de conexión a red (*on-grid*) conectado a la salida del inversor bidireccional (acoplamiento en corriente alterna).
- Sistema FV con inversor de conexión a red conectado en paralelo con el inversor bidireccional.

El dispositivo para gestión de la energía o controlador realiza una gestión inteligente de los flujos de energía entre los diferentes componentes del sistema y con la red eléctrica de la distribuidora, en base al estado de carga del banco de baterías, la disponibilidad de generación FV y el consumo de las cargas. En caso de parámetros de red fuera de rango, el controlador desconecta el sistema de la red y pasa a funcionar en modo isla. La Figura 1 muestra las posibles direcciones del flujo de energía en las diferentes ramas del circuito (flechas en rojo).

La configuración con acoplamiento en corriente continua es la más eficiente para almacenar energía en el banco de baterías para su utilización en otros momentos del día, dado que solo requiere la conversión de continua a alterna en el momento de uso de la energía. En cambio, el acoplamiento en alterna de un inversor de conexión a red, cuando se utiliza para almacenar energía excedente en las baterías, requiere una triple conversión: de continua a alterna en el inversor de conexión a red, de alterna a continua en el inversor bidireccional para la carga de las baterías, y finalmente de continua a alterna al momento de uso.

Una de las mayores ventajas del almacenamiento acoplado en corriente alterna es que convierte cualquier instalación eléctrica, con o sin generación FV, en un sistema preparado para usar con baterías, que puede a su vez trabajar en forma aislada en caso de ausencia del suministro de energía eléctrica de la red pública. La Figura 1 muestra un sistema de almacenamiento de energía basado esencialmente en un inversor / cargador (o inversor bidireccional), con su correspondiente controlador, y generación FV integrada en tres configuraciones diferentes (Victron, 2022). La configuración con acoplamiento del sistema FV en corriente alterna permite que el inversor de conexión a red continúe inyectando energía aún en ausencia de la red eléctrica pública gracias a la microrred aislada generada por el inversor /

cargador en caso de falla del servicio eléctrico. Por el contrario, el inversor *on-grid* conectado directamente a la red, no inyecta energía en ausencia de suministro eléctrico de la distribuidora.

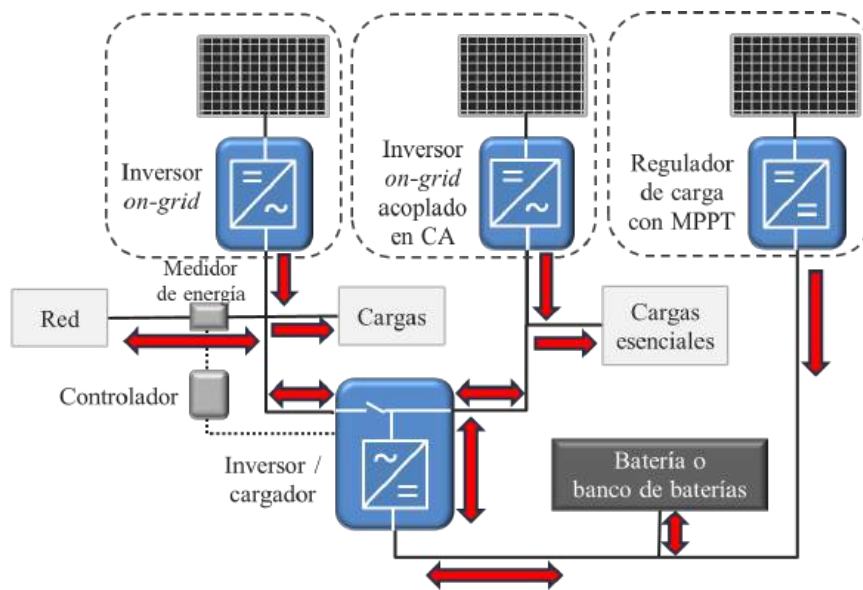


Figura 1: Sistema de almacenamiento de energía con generación FV en tres configuraciones diferentes: (i) regulador de carga acoplado en corriente continua; (ii) inversor de conexión a red acoplado en corriente alterna; (iii) inversor de conexión a red conectado directamente al medidor de la distribuidora. Elaboración propia basada en Victron (2022).

El presente trabajo es continuación del publicado en la revista AVERMA en el año 2022 (Godfrin et al., 2022), donde se habían presentado simulaciones del funcionamiento de un sistema FV con almacenamiento en batería de Li-ion. En esta oportunidad se analiza el funcionamiento de un sistema de almacenamiento de energía, operativo desde fines de julio de 2022, que cuenta con dos sistemas FV, uno acoplado en corriente continua a través de un regulador de tensión con seguidor del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) y otro de conexión a red acoplado en alterna.

GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y ALMACENAMIENTO EN LA ARGENTINA

Argentina tiene alrededor del 92 % de población urbana (DNP, 2022), muy superior a la media mundial (54 %) y por encima de la media regional (83 %). Como consecuencia de ello, la mayor parte de su consumo eléctrico está concentrado en áreas urbanas (el Gran Buenos Aires, por ejemplo, consumió en 2022 el 37,4 % de la demanda eléctrica del país; CAMMESA, 2022). Dadas estas características y la disponibilidad de recurso solar apropiado, la utilización masiva de generación FV distribuida ubicada en áreas urbanas y periurbanas contribuirá en forma significativa a la transición hacia una matriz eléctrica más limpia y sostenible. Sin embargo, una participación importante de generación FV en la matriz requerirá el uso de sistemas de almacenamiento que contribuyan a manejar la variabilidad del recurso y a compensar los desacoplamientos entre oferta y demanda, ayudando en particular a cubrir los picos de consumo nocturnos, asociados esencialmente a los usuarios residenciales. Al respecto, cabe mencionar que en 2022 el consumo residencial representó el 45,5 % del consumo total del país (CAMMESA, 2022).

La Provincia de Buenos Aires fue la primera en impulsar la generación distribuida mediante fuentes renovables a través del Programa Provincial de Incentivos a la Generación Distribuida (PROINGED, 2023). El objetivo de este programa es promover la instalación de pequeñas plantas de generación conectadas a la red eléctrica pública para mejorar el servicio eléctrico, aunque no contempla la figura de usuario-generador o prosumidor.

Santa Fe fue la primera provincia argentina en habilitar la generación eléctrica distribuida en baja tensión para usuarios particulares en el año 2013. Luego se sumaron las provincias de Salta, en 2014, y Mendoza,

en 2015. A nivel nacional, en 2017 se promulgó la Ley 27.424 "Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica". En Videla et al. (2023) puede verse una descripción de las diferentes regulaciones sobre generación distribuida mediante energías renovables en las jurisdicciones del país con mayor desarrollo de esta tecnología.

Las primeras reglamentaciones de generación distribuida desarrolladas en la Argentina no contemplaron sistemas de almacenamiento conectados a red. La Provincia de Mendoza fue la primera en introducir el almacenamiento de energía en la regulación sobre generación distribuida. En julio de 2018, mediante la Ley 9.084, Mendoza adhirió a la Ley Nacional 27.424, declaró de interés provincial los Recursos de Energía Distribuida (RED), que incluyen los recursos de generación distribuida, almacenamiento energético y gestión de la demanda, y fijó pautas para promover el desarrollo de redes inteligentes en el segmento de distribución. Como complemento a la figura de Usuario/Generador, creó nuevos Agentes del Régimen de RED: Usuario/Generador Colectivo, Comercializador, Almacenador Energético y Generador Virtual (EPRE, 2022).

En el año 2020, la Provincia de Santa Fe creó el programa Energía Renovable para el Ambiente (ERA, 2023) con el objetivo de incentivar el uso de energías renovables para generación de energía eléctrica distribuida, impulsar el desarrollo de redes inteligentes y promover el uso eficiente de la energía. El programa ERA habilita la incorporación de almacenamiento a los sistemas de generación distribuida, permitiendo en consecuencia aumentar el autoconsumo a través de la gestión de la energía (Santa Fe, 2020).

En lo referente a cuestiones técnicas, la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) emitió en el año 2015 la Reglamentación AEA 90364-7-712 (AEA, 2015), "Sistemas de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos", que no contempla sistemas con acumulación de energía. A agosto de 2023, se encuentra en etapa de desarrollo una actualización de dicha reglamentación, AEA 90364-7-712 Edición 02 "Sistema de suministro mediante generadores fotovoltaicos", que amplía el alcance de la Edición 2015 incluyendo sistemas de almacenamiento de energía. Asimismo, el Organismo de Estudio GT-10G (Eficiencia Energética) está desarrollando la reglamentación AEA 90364-8-2 "Instalaciones eléctricas de prosumidores en baja tensión", basada en la IEC 60364-8-82:2022 (IEC, 2023), que se aplica a instalaciones conectadas o no a una red de distribución capaces de operar con fuentes de alimentación y/o con unidades de almacenamiento locales.

Por su parte, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) desarrolló la Norma IRAM 210025, Energía solar – Inversores bidireccionales para la conexión a la red de distribución – Requisitos generales, que ya pasó por la etapa de discusión pública y se encuentra próxima a publicarse.

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR

Características de la vivienda

La vivienda unifamiliar bajo estudio está ubicada en el barrio de Saavedra de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), dentro del área de concesión de la Empresa Distribuidora y Comercializadora Norte (EDENOR S.A.). Tiene una superficie cubierta de alrededor de 80 m² y su consumo eléctrico anual es de alrededor de 4.000 kWh, un 33 % más que el consumo medio anual de un usuario residencial en la Ciudad de Buenos Aires (\cong 3000 kWh/año en 2022), según datos de la Dirección General de Estadística y Censos del Ministerio de Economía y Finanzas del Gobierno de la Ciudad (CABA, 2023). El acondicionamiento de aire se realiza mediante equipos eléctricos, esencialmente con 3 equipos de aire acondicionado frío/calor de tecnología Inverter y 1 calientador. El resto del equipamiento eléctrico incluye 1 heladera de 300 dm³ (sin freezer), 1 freezer de 207 dm³, 1 lavarropas, 1 lavavajillas, 2 televisores (de 26" y 55"), 1 horno a microondas, 1 horno eléctrico, 2 computadoras portátiles, pequeños electrodomésticos y luminarias (en su amplia mayoría LED).

Sistema de almacenamiento de energía con generación FV instalado en la vivienda

En julio de 2022 se diseñó e instaló un sistema de almacenamiento de energía basado en un inversor/cargador con el dispositivo de control integrado, al cual se le acopló en la salida de corriente alterna un sistema FV de conexión a red, compuesto por un inversor de 1,5 kW y 7 módulos FV de 275

W_p cada uno (potencia FV total de 1,92 kW_p), preexistente en la vivienda (Godfrin et al., 2022). Dicho sistema FV de conexión a red fue dimensionado para generar anualmente alrededor del 70 % del consumo de la vivienda. Con el objeto de reforzar la generación en las épocas del año de mayor consumo (invierno), a principios de diciembre de 2022 se agregó generación FV acoplada en corriente continua con una potencia adicional de 1,1 kW_p . La Figura 2 muestra la configuración final del sistema con los siguientes componentes:

- Inversor/cargador Victron MultiPlus-II GX 48/5000/70-50, con una potencia continua máxima de salida de 4 kW a 25°C y 3,7 kW a 40°C (Victron, 2023a).
- Batería recargable de Li-ion Pylontech UP5000, con tensión nominal de 48 V, capacidad nominal de 4,8 kWh, capacidad utilizable de 4,56 kWh y una profundidad máxima de descarga del 95 % (Pylontech, 2023).
- 1 inversor FV SMA Sunny Boy 1.5 de 1,5 kW (SMA, 2021).
- 7 módulos FV de silicio policristalino de 275 W_p , Amerisolar modelo AS-6P30 (Amerisolar, 2017), orientados a 32° al oeste del norte (Azimut \cong 32°), siguiendo la orientación de la construcción, con una inclinación de 15° con respecto al plano horizontal, y conectados en serie.
- Protecciones según lo especificado en la reglamentación vigente).
- 1 regulador de carga Victron modelo SmartSolar MPPT 150/35, para baterías de 12, 24, 36 o 48 V con selección automática y una potencia FV nominal de 2 kW (Victron, 2023b).
- 2 módulos FV de silicio monocristalino de 550 W_p , Jinko modelo JKM550M-72HL4-V (Jinko, 2023), orientados a 58° al este del norte (Azimut \cong -58°), con una inclinación de 10° con respecto al plano horizontal, y conectados en serie.

El dispositivo de control integrado en el inversor/cargador gestiona el sistema de almacenamiento, comunicándose con otros componentes a través de diferentes interfaces de comunicación (interfaz BMS-Can, puertos USB, Ethernet y VE.Direct). Asimismo, se puede realizar el seguimiento remoto del ESS a través del portal VRM, que permite monitorear el funcionamiento y configurar las variables del Sistema a distancia.

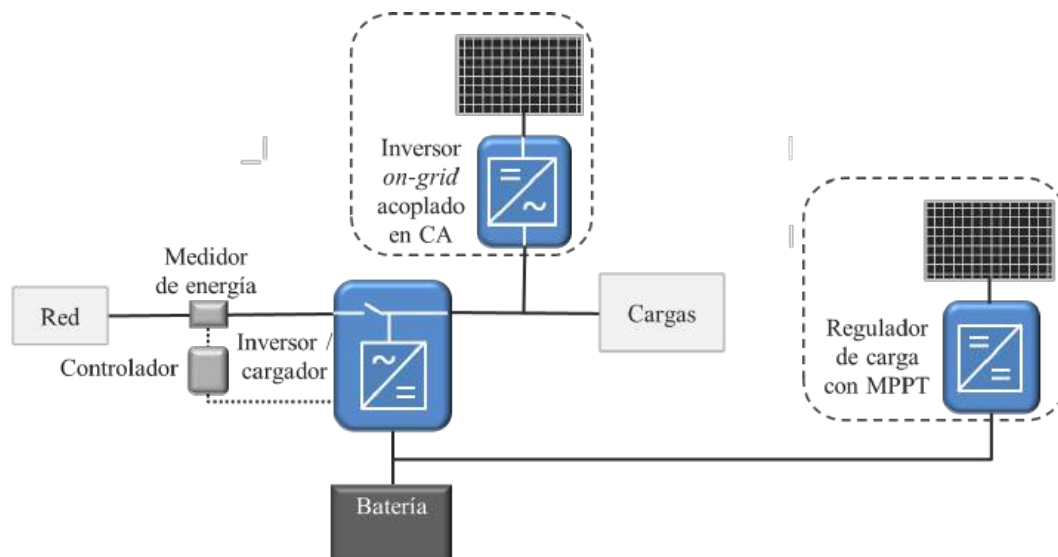


Figura 2: Sistema de almacenamiento de energía con generación FV de la vivienda.

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN EL PERÍODO AGOSTO DE 2022 A JULIO DE 2023

Se analizó el funcionamiento del sistema en el período agosto de 2022 a julio de 2023, tomando como referencia el funcionamiento del sistema FV conectado a la red interna de la vivienda, o sea acoplado en corriente alterna. Teniendo en cuenta que toda la red interna se encuentra conectada a la salida del inversor/cargador (Output 1 en Figura 1), se puede estudiar el caso sin almacenamiento a partir de los

datos de flujo de energía a través de dicha salida como si se tratara del punto de conexión a la red de la distribuidora.

Sistema FV sin almacenamiento

El análisis del funcionamiento del sistema FV de conexión a red, sin inversor bidireccional ni almacenamiento ni FV acoplado en continua, y su aporte al consumo de la vivienda se realizó considerando las siguientes variables, medidas en la salida Output 1 y registradas en la plataforma VRM, a excepción de la generación FV que se obtuvo de la plataforma Sunny Portal de SMA.

$C_{Output1}$ [kWh]: consumo de energía eléctrica desde el inversor/cargador a través de Output 1.

G_{FVCA} [kWh]: generación eléctrica del sistema FV conectado a la red interna de la vivienda (acoplado en alterna).

$I_{Output1}$ [kWh]: inyección de energía eléctrica al inversor/cargador a través de Output 1.

C_V [kWh]: consumo eléctrico de las cargas de la vivienda, dado por $C_V = C_{Output1} + G_{FVCA} - I_{Output1}$.

E_{autCA} [kWh]: energía eléctrica generada por el sistema FV acoplado en alterna y consumida en la vivienda (autoconsumida), dada por $E_{autCA} = G_{FVCA} - I_{Output1}$.

Autoabastecimiento [%]: fracción de C_V provista por FV acoplado en alterna (E_{autCA} / C_V).

Autoconsumo [%]: porcentaje de G_{FVCA} consumida en la vivienda (E_{autCA} / G_{FVCA}).

A fin de evaluar el ahorro en la facturación del servicio eléctrico teniendo en cuenta el modelo tarifario de facturación neta fijado por la Ley 27.424 resulta necesario conocer para cada bimestre la energía consumida de la red y la energía inyectada a la misma, como también la producción FV. La Tabla 1 muestra los valores de estas variables para los 6 bimestres comprendidos entre agosto de 2022 y julio de 2023 para el caso del sistema FV sin almacenamiento. La numeración de los bimestres y el período que abarcan son los utilizados por la distribuidora en la facturación del servicio eléctrico: bimestre 1, diciembre y enero; bimestre 2, febrero y marzo; y así sucesivamente. Se observa que la vivienda considerada tiene un pico de consumo en invierno (bimestre 4), asociado al uso de equipos de aire acondicionado para calefacción.

En el período analizado el 39 % de la energía FV generada por el sistema de conexión a red (SMA SB1.5 con una potencia FV de 1,92 kW_p) habría sido consumida en la vivienda de no existir el almacenamiento, abasteciendo el 28 % de la energía total consumida ($C_V = 3.771$ kWh).

Tabla 1: Valores bimestrales de consumo, generación FV, energía inyectada, autoconsumo y autoabastecimiento para el período agosto de 2022 a julio de 2023 para el caso sin almacenamiento.

Bim.	Período de Consumo		Consumo de red (kWh)	Generac. FV (kWh)	Inyección a red (kWh)	Energía FV autoc. (kWh)	Auto-consumo (%)	Auto-abastec. (%)
5/22	29/07/22	01/10/22	528	439	242	197	45 %	27 %
6/22	01/10/22	30/11/22	271	539	383	156	29 %	37 %
1/23	30/11/22	29/01/23	404	617	409	208	34 %	34 %
2/23	29/01/23	31/03/23	390	533	335	198	37 %	34 %
3/23	31/03/23	31/05/23	306	351	229	122	35 %	28 %
4/23	31/05/23	30/07/23	819	243	72	171	70 %	17 %
TOTAL			2719	2722	1670	1052	39 %	28 %

Sistema de almacenamiento de energía con generación FV

El análisis del funcionamiento del sistema de almacenamiento de energía con generación FV acoplada en alterna y en continua, descrito en la sección precedente, se realizó considerando las siguientes variables, medidas por el inversor/cargador y registradas en la plataforma VRM, a excepción de la generación FV acoplada en alterna que se obtuvo de la plataforma Sunny Portal de SMA.

C_{Input} [kWh]: consumo de energía eléctrica desde la red pública a través de la entrada (Input) del inversor/cargador. Dado que el equipo está directamente conectado a la acometida, esta variable también mide el medidor de la distribuidora. Habiéndose observado pequeñas diferencias ($\pm 2\%$) entre los valores registrados en VRM y los informados en la factura del servicio eléctrico, se optó por utilizar estos últimos.

G_{FV} [kWh]: suma de la generación FV acoplada en alterna y la acoplada en continua.

I_{Input} [kWh]: inyección de energía eléctrica a la red pública. Al igual que en el caso del consumo de red (C_{Input}), se consideraron los valores de la energía inyectada a la red informados en la factura.

C_T [kWh]: consumo eléctrico total de la vivienda, incluyendo pérdidas en el inversor/cargador y en los procesos de carga y descarga de la batería, dado por $C_T = C_{Input} + G_{FV} - I_{Input}$.

E_{aut} [kWh]: energía eléctrica generada por los 2 sistemas FV consumida en la vivienda (autoconsumida), dada por $E_{aut} = G_{FV} - I_{Input}$.

Autoabastecimiento [%]: fracción de C_T provista por FV autoconsumida (E_{aut} / C_T).

Autoconsumo [%]: porcentaje de G_{FV} consumida en la vivienda (E_{aut} / G_{FVCA}).

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos para los 6 bimestres considerados. El agregado de almacenamiento permitió llevar el autoconsumo en el bimestre 5/22 de 45 % a 82 %, pasando el autoabastecimiento de 27 % a 47 %, y en el bimestre 6/22, de 29 % a 67 %, pasando el autoabastecimiento de 37 % a 75 %. Los valores de autoconsumo y autoabastecimiento para los otros 4 bimestres no son directamente comparables dado que el caso sin almacenamiento no consideró la potencia FV acoplada en corriente continua para el cálculo de dichas variables.

Se observa que el sistema de almacenamiento está subdimensionado en relación con la potencia FV instalada, dando lugar a períodos del año con importantes excedentes de energía que no pudieron ser utilizados para reducir el consumo de red (ver, por ejemplo, los bimestres 1 y 2 de 2023).

Es de destacar que el consumo total de la vivienda ($C_T = C_{Input} + G_{FV} - I_{Input}$) se incrementa con el agregado del almacenamiento como consecuencia de las pérdidas en el inversor bidireccional y en los ciclos de carga y descarga de la batería, pasando de 3.771 kWh/año en la instalación sin almacenamiento a 4.090 kWh/año con almacenamiento.

Tabla 5: Valores bimestrales de consumo, generación FV, energía inyectada, autoconsumo y autoabastecimiento para el período agosto de 2022 a julio de 2023 para el caso con almacenamiento.

Bim.	Período de Consumo		Consumo de red (kWh)	Generac. FV (kWh)	Inyección a red (kWh)	Energía FV autoc. (kWh)	Auto-consumo (%)	Auto-abastec. (%)
5/22	29/07/22	01/10/22	404	439	79	360	82 %	47 %
6/22	01/10/22	30/11/22	119	539	179	360	67 %	75 %
1/23	30/11/22	29/01/23	222	999	536	463	46 %	68 %
2/23	29/01/23	31/03/23	222	878	445	433	49 %	66 %
3/23	31/03/23	31/05/23	187	576	276	300	52 %	62 %
4/23	31/05/23	30/07/23	674	400	54	346	87 %	34 %
TOTAL			1.828	3.831	1.569	2.262	59 %	55 %

La Figura 3 muestra el consumo bimestral de energía desde el bimestre 5/21 hasta el bimestre 4/23, discriminado en energía aportada por FV (barra en amarillo) y consumida de la red (barra en rojo), y la energía solar inyectada a la red pública (cuadrado en verde). Se observa claramente la diferencia en la relación entre energía FV autoconsumida y energía inyectada a la red a partir del bimestre 5/22, o sea luego de la instalación del inversor bidireccional y la batería. La diferencia más clara se ve entre los bimestres 6/21 y 6/22. A partir del bimestre 1/23 se observa un aumento del aporte solar y también de la energía inyectada a la red, como consecuencia de la instalación, en diciembre de 2022, del sistema FV acoplado en continua.

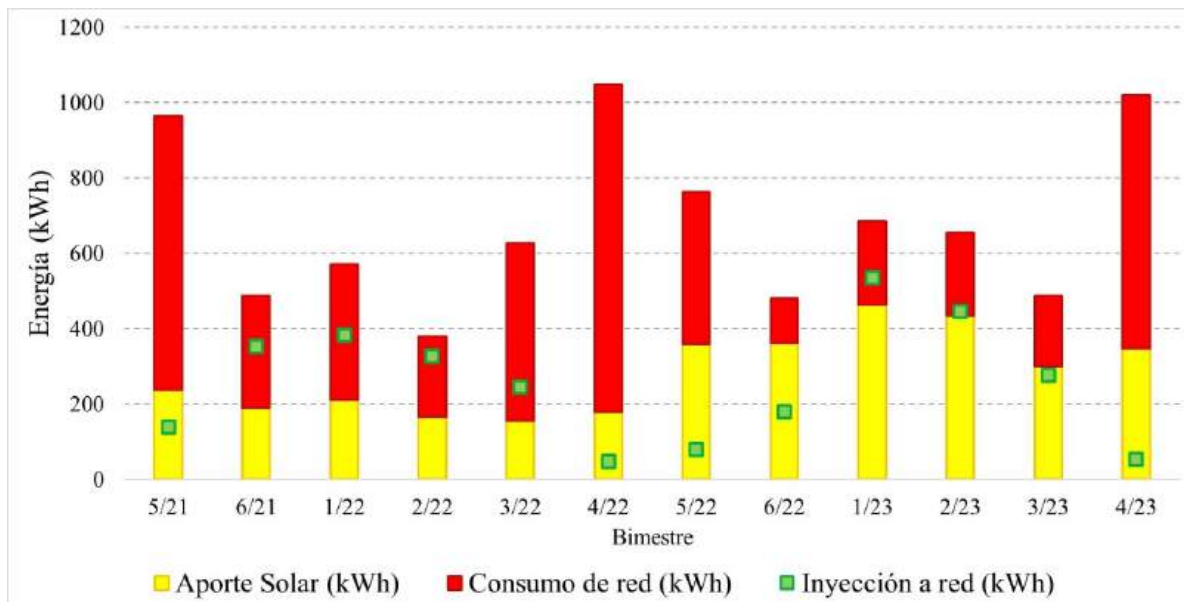


Figura 3: Consumo bimestral de energía, discriminado en energía aportada por FV y consumida de la red, y la energía solar inyectada a la red pública, entre agosto de 2021 y julio de 2023.

AHORROS EN EL SERVICIO ELÉCTRICO

El costo anual del servicio eléctrico en presencia del sistema de almacenamiento de energía con generación FV se obtuvo considerando el modelo tarifario para la generación distribuida definido en la Ley 27.424 y las siguientes hipótesis:

- Cuadro Tarifario (Tarifa 1 – R) y tarifa de inyección para clientes residenciales Nivel 1 (altos ingresos), establecidos mediante Resolución 574/2023 (ENRE, 2023) del Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), vigentes a partir del 1 de agosto de 2023.
- Tarifas constantes durante los 12 meses.

A fin de evaluar los ahorros en presencia del sistema de almacenamiento con generación FV, se obtuvo primeramente el costo anual, incluyendo impuestos (IVA y contribución municipal), del servicio eléctrico de la vivienda sin generación FV ni almacenamiento, los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Costo anual del servicio eléctrico de la vivienda.

Año	Bimestre	Energía Consumida (kWh)	Tarifa	Cargos Red + Imp.
2022	5	725	R3	\$ 28.882
2022	6	427	R2	\$ 16.834
2023	1	612	R2	\$ 23.616
2023	2	588	R2	\$ 22.777
2023	3	430	R2	\$ 16.933
2023	4	990	R6	\$ 43.867
TOTAL				\$ 152.908

Las Tablas 7 y 8 presentan los costos bimestrales netos, dados por los cargos de red (incluyendo impuestos) por la energía consumida menos el reintegro por la energía inyectada, para la instalación con sistema FV de conexión a red y con sistema de almacenamiento, respectivamente.

Tabla 7: Costo anual del servicio eléctrico con sistema FV de conexión a red.

Año	Bim.	Energía Consum. (kWh)	Energía Inyect. (kWh)	Tarifa	Cargos Red + Imp.	Reint. Inyección	NETO
2022	5	528	242	R2	\$ 20.612	-\$ 6.182	\$ 14.429
2022	6	271	383	R1	\$ 10.497	-\$ 9.785	\$ 713
2023	1	404	409	R2	\$ 15.968	-\$ 10.449	\$ 5.520
2023	2	390	335	R2	\$ 15.476	-\$ 8.563	\$ 6.912
2023	3	307	229	R2	\$ 12.426	-\$ 5.850	\$ 6.576
2023	4	819	72	R4	\$ 33.076	-\$ 1.839	\$ 31.237
TOTAL							\$ 65.386

Tabla 8: Costo anual del servicio eléctrico con sistema de almacenamiento de energía y generación FV conectado a la red interna de la vivienda.

Año	Bim.	Energía Consum. (kWh)	Energía Inyect. (kWh)	Tarifa	Cargos Red + Imp.	Reint. Inyección	NETO
2022	5	404	79	R2	\$ 16.050	-\$ 2.018	\$ 14.032
2022	6	119	179	R1	\$ 4.926	-\$ 4.573	\$ 353
2023	1	222	536	R1	\$ 8.701	-\$ 13.693	-\$ 4.992
2023	2	222	445	R1	\$ 8.711	-\$ 11.368	-\$ 2.658
2023	3	187	276	R1	\$ 7.428	-\$ 7.051	\$ 377
2023	4	674	54	R3	\$ 26.877	-\$ 1.380	\$ 25.498
TOTAL							\$ 32.609

Comparando el costo anual del servicio eléctrico con el sistema de almacenamiento de energía con generación FV acoplada en corriente continua y en corriente alterna (Tabla 8) con el costo anual sin generación FV (Tabla 6), resulta un ahorro de aproximadamente 120.000 \$/año, que equivale a aproximadamente 330 USD/año considerando la cotización del USD tipo vendedor del Banco de la Nación Argentina (BNA, 2023) del día 29 de septiembre de 2023 (365,5 \$/USD). Cabe destacar que se trata de una estimación preliminar dado que en los dos primeros bimestres (5/22 y 6/22) no estaba aún instalado el sistema FV acoplado en corriente continua. Por su parte, el ahorro sólo con sistema FV conectado a red sería de 87.500 \$/año, equivalente a 240 USD/año.

En el contexto argentino actual carece de sentido realizar un análisis económico de este tipo de instalaciones dado que los precios de los equipos están fuertemente distorsionados dadas las dificultades existentes para realizar las importaciones. Ello dio lugar a que los precios de los componentes básicos de un sistema de almacenamiento con generación FV se encuentren muy por encima de los valores internacionales.

Se dan a continuación precios indicativos de equipamiento nacionalizado de similares características al presentado en este artículo (Maril, 2023): módulos FV con una potencia total de 3 kW_p, 2.100 USD (0,70 USD/W_p); inversor/cargador de 3 kW, 2.700 USD; inversor *on-grid* de 1,5 kW, 650 USD; batería de Litio de 5 kWh, 4.600 USD. El precio total del equipamiento principal para una instalación como la analizada en este trabajo es superior a 10.000 USD más impuestos. A este monto hay que sumarle el costo de las estructuras, materiales eléctricos, regulador de tensión y mano de obra. Resulta evidente que, en la actualidad, este tipo de instalaciones son económicamente inviables en el país.

CONCLUSIONES

El crecimiento sostenido de la generación eléctrica mediante fuentes renovables variables, en especial la energía solar fotovoltaica, hace necesario impulsar el uso de sistemas de almacenamiento de energía que permitan manejar la variabilidad del recurso y mejorar la relación oferta-demanda. Ello es particularmente importante en el caso de usuarios residenciales que tienen, en general, sus picos de consumo en horarios nocturnos, y que representan más del 45 % del consumo eléctrico total del país.

A pesar de los problemas recurrentes de inestabilidad macroeconómica de la Argentina, se han observado desarrollos incipientes de la generación distribuida utilizando la tecnología solar fotovoltaica en varias provincias, haciendo uso de instrumentos legales, regulatorios y de promoción apropiados según la decisión política de cada jurisdicción. Por otra parte, las primeras reglamentaciones desarrolladas no contemplaron sistemas de almacenamiento conectados a red. Recién en los últimos años algunas provincias (Mendoza en 2018 y Santa Fe en 2020) incluyeron en sus reglamentaciones el uso de almacenamiento, acoplado o no a sistemas de generación distribuida.

En este trabajo se presenta el análisis del funcionamiento de un sistema de almacenamiento de energía con generación fotovoltaica instalado en una vivienda unifamiliar en la Ciudad de Buenos Aires, como un estudio de caso que permite mostrar las mejoras en el autoconsumo de la energía generada y evaluar los ahorros esperados en las facturas del servicio eléctrico. Los resultados obtenidos y los precios del equipamiento muy superiores a los valores internacionales muestran que el ahorro anual esperado es absolutamente insuficiente para recuperar la inversión en un tiempo razonable, incluso con la tarifa Nivel 1 que aplica a usuarios residenciales con altos ingresos.

En el marco de tarifas eléctricas que continúan siendo mayormente subsidiadas, resulta necesario considerar incentivos económicos particulares, tanto para la generación fotovoltaica como para sistemas de almacenamiento, de tal manera que estas tecnologías puedan competir en condiciones más favorables con las fuentes de generación convencionales. En el mismo sentido, serían extremadamente necesarias líneas de crédito preferenciales para la financiación de los equipos que componen este tipo de sistemas, de manera que se estimule su proliferación.

La generación de energía proveniente de fuentes renovables y la reducción de gases de efecto invernadero deben jugar un rol fundamental en esta coyuntura. Estas tecnologías aportan al desarrollo social y pueden constituir una herramienta para fomentar un orden económico comunitario, en línea con la idea de soberanía energética en el sentido más amplio: no solo nacional sino también ciudadana. La generación de energía por parte de los propios usuarios resulta un cambio de paradigma respecto de la propiedad de las fuentes de generación de energía, dejando de ser la comunidad, las cooperativas o asociaciones y los ciudadanos meros usuarios para transformarse en productores de la energía que consumen.

REFERENCIAS

- AEA (2015). AEA 90364 - Parte 7 - Sección 712, "Sistemas de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos", Asociación Electrotécnica Argentina. <https://aea.org.ar/?s=90364-7-712> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Amerisolar (2017). Módulo Fotovoltaico Policristalino AS-6P30, Amerisolar. Dirección URL: <https://www.weamerisolar.eu/wp-content/uploads/2017/03/AS-6P30-Module-Specification.pdf>
- CABA [en línea]. Energía Eléctrica, Dirección General de Estadística y Censos, Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. Dirección URL: <https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/?cat=368> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- CAMMESA (2022). Informe Anual 2022. Mercado Eléctrico Mayorista. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico. <https://cammesaweb.cammesa.com/informe-anual/> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Colthorpe, A. (2021). BloombergNEF: Average battery pack prices to drop below US\$100/kWh by 2024 despite near-term spikes; 1 de diciembre de 2021. <https://www.energy-storage.news/bloombergnef-average-battery-pack-prices-to-drop-below-us100-kwh-by-2024-despite-near-term-spikes/> [consulta: 22 de agosto de 2022]

- DNP (2022). “Población urbana en Argentina – Evolución y distribución espacial a partir de datos censales”, Dirección Nacional de Población. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/poblacion_urbana_dnp.pptx_.pdf [consulta: 22 de agosto de 2022]
- ENRE (2023). Resolución 574/2023, Ente Nacional Regulador de la Electricidad, EDENOR S.A. – Cuadro Tarifario. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-574-2023-387531> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- EPRE [en línea]. Informes sobre Recursos Energía Distribuida, Enero 2023. Ente Provincial Regulador Eléctrico (EPRE). Provincia de Mendoza. <https://www.epremendoza.gov.ar/2019/usuariogenerador/> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- ERA [en línea]. Energía Renovable para el Ambiente. Energía de Santa Fe. <https://epe.santafe.gov.ar/programa-era/> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Fitzgerald, G., Mandel, J., Morris, J., Touati, H. (2015). The Economics of Battery Energy Storage: How multi-use, customer-sited batteries deliver the most services and value to customers and the grid. Rocky Mountain Institute, September 2015. Dirección URL: <https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/RMI-TheEconomicsOfBatteryEnergyStorage-FullReport-FINAL.pdf> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Fortune Business Insights (2022). Battery Energy Storage Market, informe generado por Fortune Business Insights; ID: FBI100489. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/battery-energy-storage-market-100489> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Godfrin, E.M., Krautner, A., Durán, J.C. (2022). Análisis de un sistema fotovoltaico con almacenamiento conectado a red en una vivienda unifamiliar en la Ciudad de Buenos Aires: autoconsumo, inyección a red y ahorros en la factura del servicio eléctrico, AVERMA, Vol. 26, pp. 103-114 (2022).
- IEA [en línea] Grid-Scale Storage, International Energy Agency (IEA). Dirección URL: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- IEC [en línea]. IEC 60364-8-82:2022, Low-voltage electrical installations - Part 8-82: Functional aspects - Prosumer's low-voltage electrical installations, International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/publication/66287> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Jinko (2023). Tiger Pro 72HC 530-550 Watt Monofacial Module, Datasheet, Jinko Solar. [https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-(V)-F1-EN.pdf) [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Maril (2023). Comunicación personal con Pablo Maril, instalador de sistemas fotovoltaicos. <https://pablomaril.com.ar/#!/-bienvenido/>
- PROINGED [en línea]. Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida. Energías Renovables, Provincia de Buenos Aires. <https://www.freba.org.ar/proinged/>
- Pylontech (2023). Pylontech UP5000. Dirección URL: <https://www.teci.co.za/wp/wp-content/uploads/2021/02/UP5000-V1.0-Product-Manual.pdf> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Santa Fe (2020). Decreto 1098/2020. Provincia de Santa Fe. <https://epe.santafe.gov.ar/programa-era/wp-content/themes/prosumidores/documentos/2020%20-%20Decreto%201098%20-%20Programa%20ERA%20-%20Rev.2.pdf> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- SMA (2017). Ventajas de la batería de alta tensión conectada en CA sobre otras soluciones alternativas. <https://www.sma-sunny.com/es/ventajas-de-la-bateria-de-alta-tension-conectada-en-ca-sobre-otras-soluciones-alternativas/> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- SMA (2021a). Sunny Boy 1.5 / 2.0 / 2.5, SMA Solar Technology AG. Dirección URL: <https://www.sma.de/es/productos/inversor-fotovoltaico/sunny-boy-15-20-25.html> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., Staffell, I. (2019). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. Joule 3, 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008> [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Victron (2022). Manual de diseño es instalación de ESS, Rev 06 09/2022, Victron Energy. https://www.victronenergy.com/upload/documents/Energy_Storage_System/6292-ESS_design_and_installation_manual-pdf-es.pdf [consulta: 22 de agosto de 2022]
- Victron (2023a). Victron Energy, MultiPlus-II GX. Dirección URL: <https://www.victronenergy.com/es/inverters-chargers/multiplus-ii-gx> [consulta: 22 de agosto de 2022]

Victron (2023b). Controlador de carga SmartSolar MPPT 150/35, Victron Energy.

<https://www.victronenergy.com.es/upload/documents/Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-150-35-&-150-45-ES.pdf> [consulta: 22 de agosto de 2022]

Videla, M., Krautner, A., Eyra, I., Durán, J.C., Plá, J. (2023). Estado actual del desarrollo de la generación fotovoltaica en Argentina, Ciencia e Investigación Tomo 73 N° 1, 54-71. <https://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2023/05/04-Duran-CeI73-1.pdf> [consulta: 22 de agosto de 2022]

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF A RESIDENTIAL ENERGY STORAGE SYSTEM WITH PHOTOVOLTAIC GENERATION DURING ONE YEAR OF OPERATION

ABSTRACT: the performance during one year of operation of an energy storage system composed of a bidirectional inverter, a Li-ion battery, and photovoltaic generation, installed in a single-family home in the city of Buenos Aires, is analyzed. The house has a consumption of approximately 4000 kWh/year and has photovoltaic generation with a total power of approximately 3 kW_p. Considering the net billing model established by law 27424 and to evaluate the savings in electricity service bills, the variation of self-consumption and the injection of surpluses with the addition of storage to photovoltaic systems were studied. The annual savings in electricity service were estimated using the Level 1 rate chart (high income prosumers) of the distributor EDENOR, effective as of 08/01/2023. Given the high costs of photovoltaic systems in the country, the annual savings, even with the practically unsubsidized Level 1 rate, is still insufficient to recover the initial investment in a reasonable period. In the current context, the achievement of a change of scale in the installation by residential customers of systems such as the one described requires the implementation of the benefits provided for in law 27424.

Keywords: photovoltaic solar energy, distributed generation, energy storage system, self-consumption, electricity rate, savings.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL CENTRO DE ARGENTINA MEDIANTE EL USO DE WAVELETS

Emilio Bianchi^{1,2}, Tomás Guzden²

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Centro Interdisciplinario de Telecomunicaciones, Electrónica, Computación y Ciencia Aplicada (CITECCA) – Universidad Nacional de Río Negro C.P. 8400 – Río Negro
Tel. 0294-443-3186 e-mail: ebianchi@unrn.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se analizó la variabilidad de la velocidad del viento y se exploraron fuentes de predictibilidad para diferentes sitios en el centro de la Argentina para el período 1980-2022. Para esto se aplicaron herramientas de análisis espectral, análisis de tendencias y correlaciones a datos derivados de reanálisis. Los análisis indican que el comportamiento temporal de las series de velocidad del viento es poco estacionario: no se observa presencia de ciclos significativos y estables a lo largo del tiempo. Se observan tendencias a largo plazo que, en la mayoría de los casos no son significativas. Como potencial predictor de la velocidad del viento se destacan Oscilación Antártica, que muestra correlaciones negativas con el recurso eólico durante el verano, otoño y primavera; y el índice Blob, que muestra correlaciones positivas en los sitios de la Patagonia durante la primavera. El análisis de coherencia wavelet, sin embargo, muestra que las relaciones entre estos forzantes climáticos y la velocidad del viento ocurren en períodos que no son los que dominan la variabilidad temporal de las series de velocidad del viento: El espectro de potencia wavelet revela que las series de velocidad del viento concentran su variabilidad en ciclos que van desde 1 año hasta tres años (aproximadamente), mientras que las relaciones con índices climáticos ocurren en períodos más largos (> 4 años).

Palabras clave: velocidad del viento, variaciones climáticas, wavelets.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, la generación de electricidad renovable no convencional (principalmente solar y eólica) ha crecido notablemente a nivel global, aumentando su participación en las matrices de generación nacionales y regionales (WWEA, 2015; Ren21). Este incremento en la producción de energías renovables implica nuevos desafíos para los sistemas de generación; ya que esta producción es intermitente, es decir que depende de fluctuaciones meteorológicas y no coincide con la demanda de electricidad (Cosserson et al., 2013; Grams et al., 2017). El problema de la intermitencia es mayor en el recurso eólico que en el recurso solar, ya que este último concentra su variabilidad en los ciclos diario y anual, que si bien no necesariamente coinciden con la demanda de electricidad, son predecibles (Gross et al., 2006, Hoste et al., 2009; Guozden et al., 2020). Esta incertidumbre en la generación eólica afecta a diferentes actores del sector eléctrico como dueños y operadores de plantas de generación, operadores del sistema eléctrico, desarrolladores de proyectos, etc. (Albadi y El-Saadany, 2010; Orlov et al., 2020, Bett et al., 2022); y está demandando un mejor entendimiento de las causas de la variabilidad del recurso eólico (Torralba et al. 2017, Bett et al., 2022).

El recurso eólico suele presentar variabilidad en diferentes escalas temporales: desde la escala micrometeorológica (segundos a minutos), pasando por la escala diaria, la sinóptica, la estacional, anual e incluso interanual y decadal (Soberanis y Mérida, 2015; Watson, 2019). Hasta el momento, la mayor disponibilidad de pronósticos del recurso eólico ha estado limitada a la escala sinóptica (< 10 días)

(Graff et al., 2014; Torralba et al. 2017). No obstante, las variaciones y tendencias climáticas de más largo plazo (estacional, decadal) causan un gran impacto en el recurso eólico (Malloy et al., 2015; Lledó et al., 2018).

Las variaciones a largo plazo de la velocidad del viento han recibido creciente atención de parte de la comunidad científica en los últimos años (Deng et al., 2021; Wohland et al., 2021). Diferentes autores han abordado esta problemática en escalas globales y regionales. En líneas generales, se ha observado un debilitamiento global de las velocidades del viento (“global stilling”, Roderick et al., 2007) desde la década de 1960. Esta tendencia al debilitamiento fue seguida por una estabilización y aumento de la velocidad del viento (“reversal”, Zeng et al. 2019) que comenzó alrededor del año 2010. Los mecanismos físicos detrás de estas tendencias a largo plazo de la velocidad del viento no son del todo comprendidos actualmente, pero el consenso general indica que, dado que la velocidad del viento depende de gradientes de temperaturas de gran escala (Deng et al., 2021; Zha et al., 2021), estas tendencias son el resultado de i) el cambio climático de origen antropogénico (Pryor et al., 2020, Zha et al., 2021; Deng et al., 2022) y ii) la acción de oscilaciones climáticas de gran escala (como el fenómeno El Niño)(Roderick et al., 2007; Zha et al., 2021). Sin embargo, es muy difícil determinar la contribución de cada uno de estos mecanismos en variaciones a largo plazo de la velocidad del viento. Estudios de escala global (Zeng et al. 2019; Deng et al., 2021), hemisférica (Deng et al., 2021; Zha et al., 2021; Deng et al., 2022) y regional (McVicar et al., 2008; Minola et al., 2021; Liu et al., 2022) muestran una gran heterogeneidad en la magnitud, signo y duración de las tendencias de velocidad del viento, así como también en los mecanismos físicos involucrados.

Comprender los forzantes de la dinámica de largo plazo de las velocidades del viento es de gran importancia para el diseño de escenarios futuros de energía eólica. Esto implica considerar tanto los efectos del cambio climático antropogénico como las fluctuaciones debido a la variabilidad interna del sistema climático (Pryor et al., 2020). El problema reside en que la variabilidad interna del sistema climático frecuentemente manifiesta un comportamiento caótico y no estacionario, lo cual dificulta la estimación de los impactos del cambio climático y limita la precisión de las proyecciones climáticas (Pryor et al., 2020; Wohland et al., 2021; Zha et al., 2021). Por este motivo, resulta necesario un mejor entendimiento de las variaciones interanuales e interdecadales de la velocidad del viento y sus patrones de teleconexión (Pryor et al., 2020)

Como se mencionó anteriormente, diversos estudios se han dedicado a investigar la variabilidad de la velocidad del viento en relación con oscilaciones climáticas de gran escala (Zeng et al. 2019; Deng et al., 2021; Utrabo-Carazo et al., 2022). La gran mayoría de estos trabajos han analizado las velocidades del viento en el dominio temporal, con las excepciones notables de Naizghi y Ouarda (2017), y Utrabo-Carazo et al. (2023); los cuales hicieron uso de técnicas espectrales llamadas “wavelets”. Los métodos espectrales basados en wavelets resultan más apropiados para caracterizar la variabilidad y las relaciones entre series de variables climáticas, las cuales normalmente muestran comportamientos no estacionarios y además pueden contener señales transientes en múltiples escalas temporales (Coulibaly y Burn, 2004; Grinsted et al., 2004; Janicke et al., 2009; Polanco-Martinez et al., 2020). El presente trabajo tiene como objetivo realizar una primera aproximación en la implementación de técnicas espectrales basadas en wavelets para mejorar la comprensión del comportamiento temporal de la velocidad del viento y su relación con forzantes climáticos de gran escala en el centro de Argentina

METODOLOGÍA

En este trabajo se analizó el comportamiento temporal de la velocidad del viento en las localidades de Necochea, Villalonga, Pomona, Puerto Madryn, Trelew y Rawson. En estos sitios operan parques eólicos de la empresa generadora GENNEIA, y se cuenta con mediciones del recurso eólico en períodos de tiempo acotados. Estas mediciones fueron realizadas sobre mástiles a 100 metros de altura, y se utilizaron sensores de la marca Thies. Los períodos de medición de cada sitio se especifican en la tabla 2. Estos datos observados se complementaron con datos de velocidad del viento derivados del reanálisis MERRA2 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>) (Rienecker et al., 2011). Este conjunto de datos permite extender las series de velocidad del viento hasta el año 1980. Se extrajeron las variables velocidad de viento a 2, 10 y 50 metros de altura (U/V2M, U/V10M, U/V50M) en los puntos de grilla cercanos a los

nodos eólicos (figura 1) para el período 1980-2022, y se extrapola la velocidad del viento a 100 metros de altura utilizando las velocidades a estas diferentes alturas asumiendo un perfil logarítmico del viento con la altura (Staffell y Green, 2014; Staffell y Pfenninger, 2016).

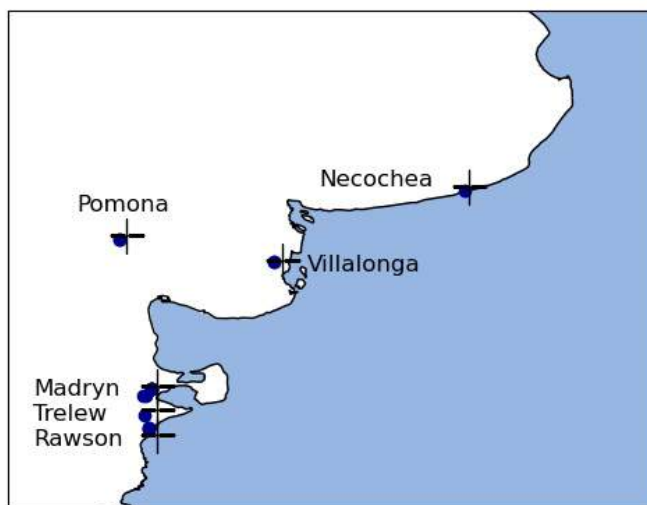


Figura 1: Ubicación de los sitios eólicos (puntos), y puntos de grilla del reanálisis MERRA2 (cruces).

Se analizó el desempeño del reanálisis MERRA2 en representar la variabilidad del viento observado calculando los estadísticos i) coeficiente de correlación y ii) error cuadrático medio en los períodos en que se solaparon las observaciones con los datos de reanálisis. Se analizó la tendencia lineal de la velocidad del viento en todos los sitios mediante la utilización del test no paramétrico de Mann-Kendall (Hamed 2008). Para analizar la ocurrencia y significancia de ciclos en la velocidad del viento, se aplicó el análisis de la transformada wavelet utilizando el software PyWavelet (<https://pypi.org/project/PyWavelets/>) (Lee et al., 2019) basado en Python. Este método permite visualizar la presencia de ciclos en series temporales que no son estacionarias (Torrence y Compo 1998). Esto significa que pueden estar presentes o ausentes durante diferentes períodos de tiempo; entonces se puede observar, para los diferentes ciclos y sus períodos, los momentos en los que estuvieron presentes. Para estudiar las relaciones entre las velocidades de viento en los diferentes sitios y forzantes climáticos de gran escala, se calcularon los coeficientes de correlación a nivel estacional entre las velocidades del viento derivadas de MERRA2 y diversos índices de oscilaciones climáticas. Los índices climáticos considerados fueron:

- Índice de Oscilación del Sur (SOI). Da cuenta de la componente atmosférica del fenómeno Niño/Niña.
- Índice Niño 3.4. Indica las anomalías de temperatura superficial del mar promediadas entre 5°N-5°S, 170°O-120°O
- Índice TSA (Tropical-South Atlantic). Indica las anomalías de temperatura superficial del mar promediadas entre 0°-20°S, 10°E-30°O
- Índice de la Oscilación Antártica (AAO). Da cuenta de variaciones en las anomalías de presión atmosférica entre latitudes medias y altas.
- Índice Blob, o "La Mancha del Pacífico". Indica las anomalías de temperatura superficial del mar promediadas entre 33°S-40°S, 152°O-162°O

Para este punto también se aplicó el análisis de coherencia wavelet (Phillips y Gorse, 2018). La coherencia wavelet puede ser explicada como un coeficiente de correlación entre dos series temporales, pero con la posibilidad de discriminar en que frecuencias o para que ciclos es mayor la correlación.

RESULTADOS

Descripción de variabilidad temporal

Los datos de velocidad del viento derivados de reanálisis muestran una alta correlación con los datos observacionales (ver figura 2 y tabla 1), lo cual valida la representación de la variabilidad de la velocidad del viento por parte del reanálisis, y permite extender el período de análisis con series homogéneas hasta el año 1980. En la tabla 2 se comparan los valores del viento P50 y promediado de las series observacionales, los promedios derivados de MERRA2 durante el periodo 1980-presente, y las diferencias porcentuales entre el viento derivado de MERRA2 durante este último periodo y durante el periodo de medición de cada parque. Se puede observar que, salvo para los casos de Pomona y Villalonga, las campañas de medición coincidieron con periodos de vientos promedio más elevados. Las diferencias porcentuales entre la velocidad del viento en el periodo 1980-presente y el periodo de medición (ambos MERRA2) alcanza el 5 % para el caso de Rawson. La figura 3 ilustra los ejemplos de Rawson y Pomona, donde las observaciones produjeron una sobreestimación y sub-estimación del recurso, respectivamente. Estas diferencias entre las estimaciones del recurso derivadas de las observaciones y las provenientes de un período más largo (posibilitado por los datos de reanálisis), pone en relieve la importancia de las variaciones de largo plazo.

Tabla 1: Coeficientes de correlación (r) y error cuadrático medio (ECM) entre series de velocidad observadas y derivadas de MERRA2

	Rawson	Trelew	Madryn	Villalonga	Pomona	Necochea
r	0.86	0.62	0.8	0.83	0.94	0.93
ECM	1.5	0.5	0.36	0.4	0.3	0.26

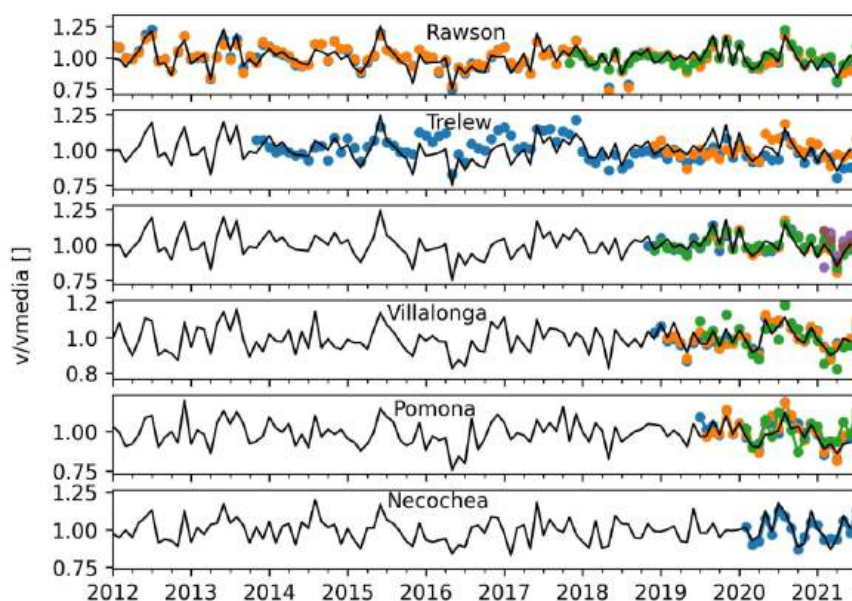


Figura 2: Series de velocidades de viento medidas (puntos) y derivadas del reanálisis MERRA2 (líneas negras)

Tabla 2: Cuadro 2: Viento P50 observacionales y derivados de MERRA2 durante el período 1980-presente

Parque	P50 obs.	P50 MERRA2 (p50obs/p50M 1980-2021)	Período medición
Rawson	7.45	8.83	+5.1 %
Trelew	9.05	8.92	+2.1 %
Madryn	8.7	8.94	+1.2 %
Villalonga	8.56	8.17	-0.7 %

Pomona	7.5	7.92	-3.5 %	11/01/2014-05/01/2016
Necochea	8.52	8.16	+1.7 %	03/24/2012-08/15/2013

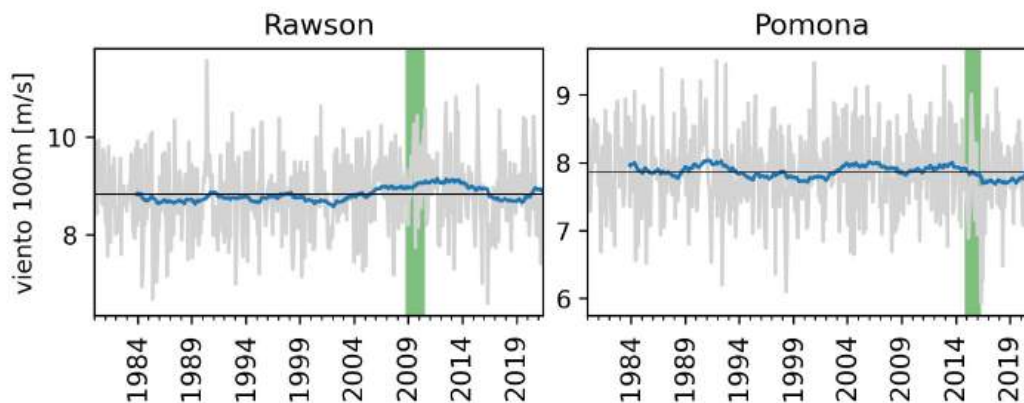


Figura 3: Promedios mensuales de viento a 100m derivados de MERRA2 (línea gris), promedios móviles de 5 años y período de medición de velocidad del viento (sombreado verde) para los sitios Rawson y Pomona. En Rawson, el valor medio calculado en el periodo de medición es 5.1 % mayor que la media total; mientras que en Pomona el valor medio calculado en este periodo es 3.5 % menor que la media total.

La figura 4 brinda una descripción de la variabilidad temporal del recurso eólico en diferentes escalas temporales: interanual, intra-anual y anual promedio. Se excluyen de este análisis los sitios de Rawson y P. Madryn ya que las series temporales son muy similares entre sí y a la serie de Trelew. Las series muestran una gran variabilidad intra e interanual. Además, se puede apreciar que el comportamiento del viento presenta, en promedio, ciclos anuales: Todos los sitios menos Pomona muestran una tendencia a vientos más débiles durante las estaciones de otoño y primavera, y vientos más fuertes en invierno y en verano. Pomona, en cambio, presenta velocidades de viento mínimas (-5 %) y máximas en el verano (+5 %). Estos ciclos anuales no se presentan con regularidad todos los años.

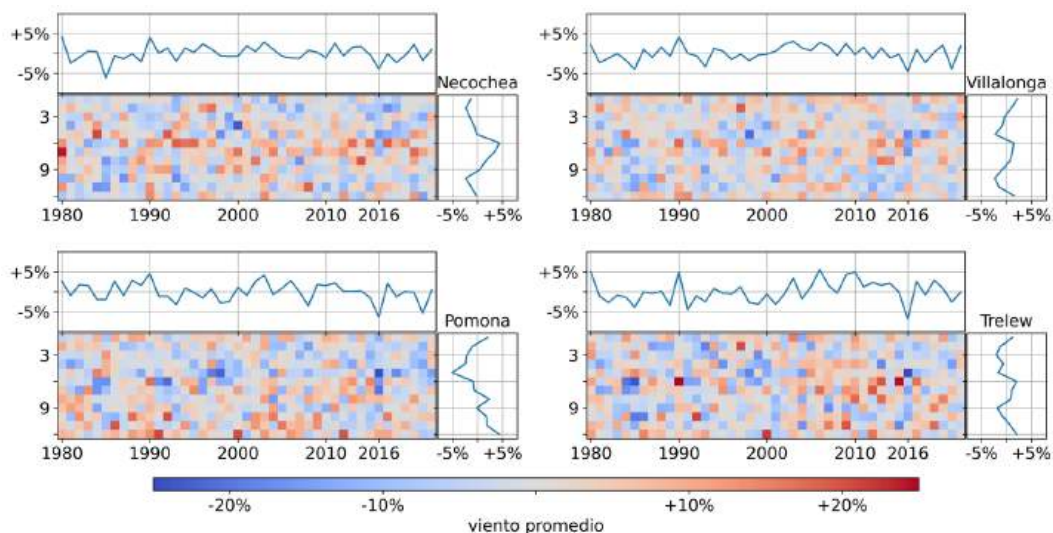


Figura 4: Variaciones de velocidad del viento mensuales (heatmap), promedios anuales (serie temporal en el panel superior de cada gráfico) y mensuales promedio (en el panel derecho de cada gráfico) durante el periodo 1980-2022 para los sitios Necochea, Villalonga, Pomona y Trelew.

En cuanto a las variaciones de más largo plazo, las rectas de regresión lineal y los resultados del test de Mann-Kendall se muestran en la figura 5. En los sitios de Patagonia (Trelew, Madryn y Rawson) se observa una tendencia positiva, aunque solo es significativa en el sitio Rawson. Los sitios Villalonga y Necochea muestran también una tendencia positiva, pero aún más leve. El sitio Pomona, por último, muestra una tendencia negativa. Ninguna de estas tendencias es estadísticamente significativa.

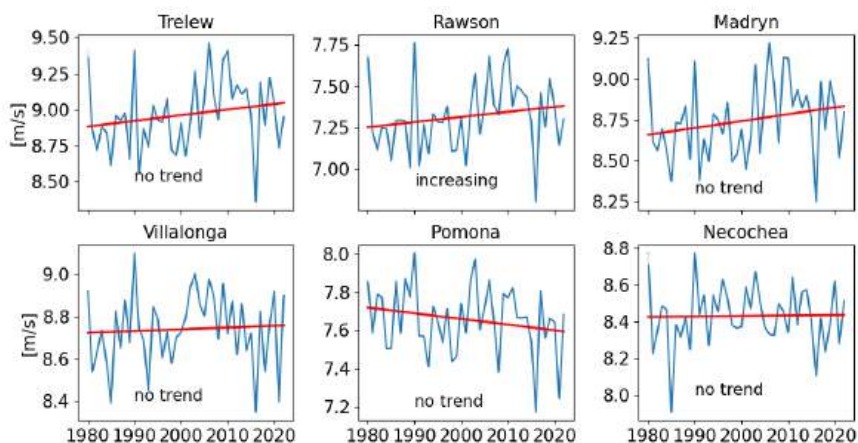


Figura 5. Recta de regresión lineal de la velocidad del viento en los diferentes sitios eólicos. En cada gráfico se indica el resultado del test de tendencia Mann-Kendall

El análisis de tendencias, sin embargo, no describe las variaciones que ocurren en escalas de tiempo más cortas que claramente se observan en las series del recurso. Los resultados del análisis de transformada Wavelet se muestran en la figura 6. Dada la similitud entre las series de velocidad del viento en los sitios Trelew, Rawson y Madryn, solo se muestran los resultados del análisis del sitio Trelew. La mayoría de los sitios muestran un comportamiento muy caótico. Es decir, no se observa la ocurrencia de ciclos significativos por periodos largos de tiempo. En la mayoría de los casos, los ciclos estadísticamente significativos corresponden a la alta frecuencia: son los que comprenden el rango de periodos que van desde los 2 meses hasta los 3 años aproximadamente; y su permanencia no se extiende en el tiempo. El ciclo anual se presenta en forma discontinua a lo largo del tiempo, y prevalece con mayor frecuencia en el sitio Pomona. El sitio más austral (Trelew) muestra la presencia de ciclos de entre 2 y 5 años de periodo a partir del año 2005 aproximadamente.

El comportamiento poco estacionario de las series de velocidad de viento que revela el análisis de wavelet impone un límite a la predictibilidad del recurso. El siguiente aspecto a explorar, es la incidencia de oscilaciones oceánicas-atmosféricas de gran escala. La figura 6 muestra las correlaciones a nivel estacional entre la velocidad del viento derivada de MERRA2 y los índices climáticos anteriormente descriptos.

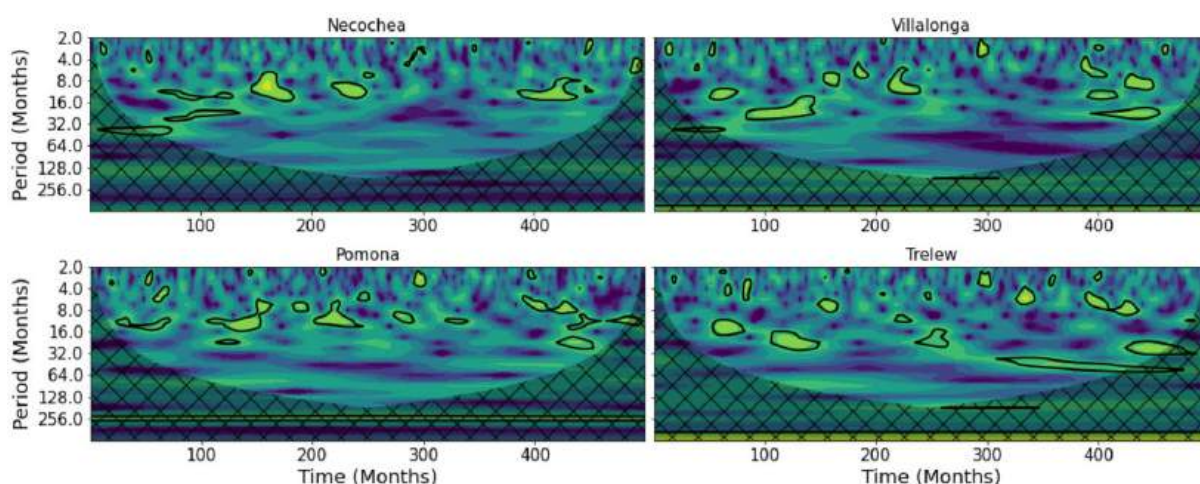


Figura 6: Espectro de potencia wavelet para los sitios Necochea, Villalonga, Pomona y Trelew: Las áreas señaladas con contornos de trazo grueso indican la presencia de ciclos con significancia estadística igual o superior al 95 %. El área sombreada indica el cono de influencia, donde los efectos de borde debido a la longitud de los ciclos dificultan la interpretación de los resultados.

Relación con forzantes de gran escala

En general, parte de la variabilidad climática que se observa a escala local, puede explicarse por la influencia de fenómenos climáticos de gran escala (por ejemplo, el fenómeno Niño/Oscilación del Sur) que actúan como forzantes. Esto aplica a la variable velocidad del viento. La figura 7 muestra los coeficientes de correlación a escala estacional entre la velocidad del viento y los forzantes climáticos SOI, TSA, Niño3.4, AAO y Blob. Se puede observar que el forzante AAO muestra la relación más robusta con las velocidades del viento de la región; se observan correlaciones negativas en las estaciones de verano, otoño y primavera. Se observa también una correlación positiva con el forzante Blob en los sitios eólicos de la Patagonia (Rawson, Trelew y Madryn), solo para la estación de primavera.

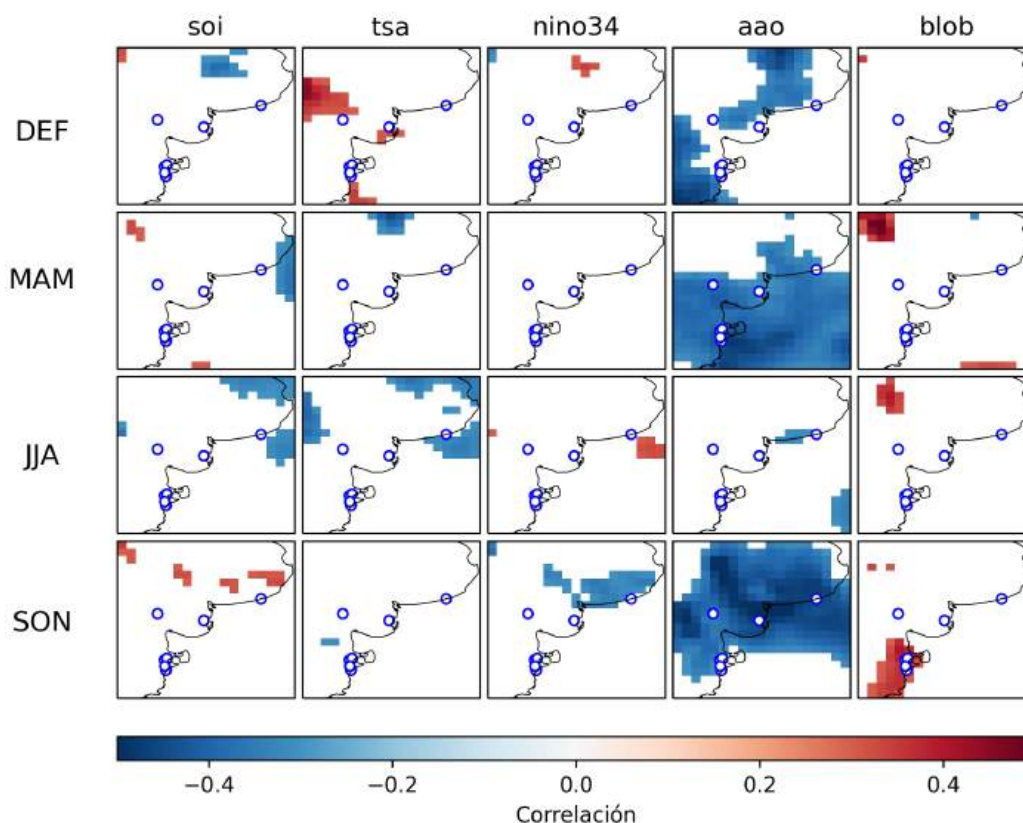


Figura 7: Coeficientes de correlación a nivel estacional entre la velocidad del viento derivada del reanálisis MERRA2 y los índices climáticos SOI, TSA, Niño3.4, AAO y Blob. Solo se muestran los valores estadísticamente significativos al 95% de nivel de confianza.

En análisis de las correlaciones no describe si estas relaciones entre la variable velocidad del viento son transientes, es decir, si cambian con el paso del tiempo; y tampoco discrimina en que frecuencias temporales ocurre esta correlación. El análisis de coherencia wavelet brinda una descripción más detallada de estas relaciones.

La figura 8 muestra los resultados del análisis de coherencia wavelet. El índice Blob muestra una coherencia muy persistente en el tiempo en las ventanas de períodos de entre 5 y 10 años, especialmente en los sitios Pomona y Villalonga. En estos sitios, muestra coherencia incluso en ciclos más largos, lo que indica que podría existir alguna relación con la tendencia de largo plazo. Para los períodos más cortos la señal se vuelve muy poco estacionaria y caótica, con alguna relación alrededor del ciclo anual. El índice de la AAO alrededor muestra correlaciones intermitentes en las ventanas de entre 1 año y medio / 2 años y aproximadamente 4 / 5 años para los sitios Pomona, Villalonga y Necochea (en este último sitio la señal es más débil). En estos sitios también se observa una señal en períodos más largos que no pueden ser capturados en este análisis dado la extensión de las series analizadas. Para el sitio Trelew se observan correlaciones, también intermitentes, en la ventana de entre 1 año y medio / 3 años.

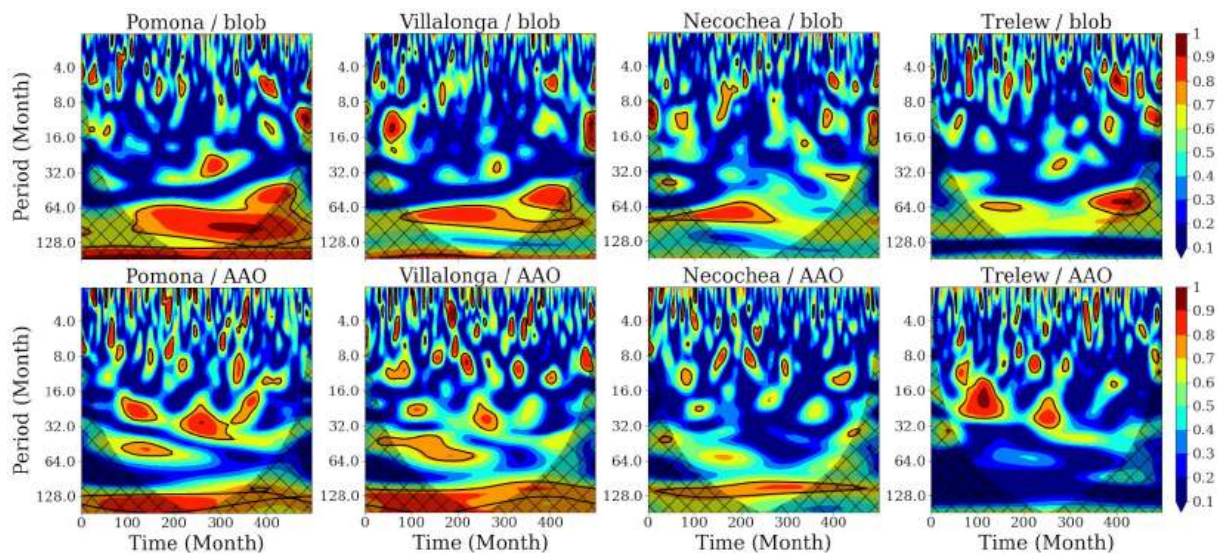


Figura 8: Coherencia wavelet entre los índices Blob y AAO y series de viento en los diferentes sitios. Las áreas señaladas con contornos de trazo grueso indican la presencia de ciclos donde la coherencia es estadísticamente significativa. El área sombreada indica el cono de influencia, donde los efectos de borde debido a la longitud de los ciclos dificultan la interpretación de los resultados.

Cabe destacar que las relaciones entre índices climáticos y las series de velocidad del viento ocurren en ciclos en que no son dominantes en el espectro de frecuencia de la velocidad del viento. El espectro de potencia wavelet revela que las series de velocidad del viento concentran su variabilidad en ciclos que van desde 1 año hasta tres años (aproximadamente), mientras que las relaciones con índices climáticos ocurren en períodos más largos. Esto relativiza la importancia de estos índices para explicar, o eventualmente pronosticar, la variabilidad del recurso.

CONCLUSIONES

El presente trabajo representa una primera aproximación en la implementación de técnicas espectrales basadas en wavelets para analizar el comportamiento temporal de la velocidad del viento y su relación con forzantes climáticos de gran escala en el centro de Argentina. Se aplicaron también técnicas convencionales para analizar variaciones de largo plazo y relaciones con oscilaciones climáticas. El análisis revela patrones de variabilidad temporal complejos, con rasgos caóticos, en los cuales la variabilidad parece concentrarse en ciclos no estacionarios comprendidos entre los 6 meses y los cuatro años. Esto incluye al ciclo anual. También existen tendencias de largo plazo, pero en la mayoría de los casos no son estadísticamente significativas. En cuanto a los forzantes climáticos de la variabilidad, se destaca el rol de las oscilaciones AAO y Blob. El análisis de coherencia wavelet, sin embargo, revela que la importancia de estas relaciones es relativa ya que se concentra en ciclos más largos que los que dominan la variabilidad de la velocidad del viento. La aplicación de estas técnicas espectrales posibilita un análisis más exhaustivo de la variabilidad del recurso eólico. Es necesario continuar estos tipos de análisis ampliando la región geográfica, incorporando diferentes resoluciones temporales, y realizando tratamientos espectrales (e.g. filtro de pasa bajo) para aislar bandas de frecuencias de interés.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó con fondos de los proyectos i) PICT-2018-04705 y ii) PI-JI UNRN 40-B-1080

REFERENCIAS

- Albadi, M. H., y El-Saadany, E. F. (2010). Overview of wind power intermittency impacts on power systems. *Electric power systems research*, 80(6), 627-632. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.10.035>
- Bett, P. E., Thornton, H. E., Troccoli, A., De Felice, M., Suckling, E., Dubus, L., ... y Brayshaw, D. J. (2022). A simplified seasonal forecasting strategy, applied to wind and solar power in Europe. *Climate services*, 27, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100318>
- Cosseron, A., Gunturu, U. B., y Schlosser, C. A. (2013). Characterization of the wind power resource in Europe and its intermittency. *Energy Procedia*, 40, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.008>
- Coulibaly, P., y Burn, D. H. (2004). Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Research*, 40(3). <https://doi.org/10.1029/2003WR002667>
- Deng, K., Azorin-Molina, C., Minola, L., Zhang, G., y Chen, D. (2021). Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations. *Journal of Climate*, 34(6), 2219-2234. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0310.1>
- Deng, K., Azorin-Molina, C., Yang, S., Hu, C., Zhang, G., Minola, L., y Chen, D. (2022). Changes of Southern Hemisphere westerlies in the future warming climate. *Atmospheric Research*, 270, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106040>
- Graff, M., Pena, R., Medina, A., y Escalante, H. J. (2014). Wind speed forecasting using a portfolio of forecasters. *Renewable Energy*, 68, 550-559. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.041>
- Grams, C. M., Beerli, R., Pfenninger, S., Staffell, I., y Wernli, H. (2017). Balancing Europe's wind-power output through spatial deployment informed by weather regimes. *Nature climate change*, 7(8), 557-562. <https://doi.org/10.1038/nclimate3338>
- Grinsted, A., Moore, J. C., y Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6), 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Gross, R., Heptonstall, P., Anderson, D., Green, T., Leach, M., y Skea, J. (2006). The Costs and Impacts of Intermittency: An assessment of the evidence on the costs and impacts of intermittent generation on the British electricity network.
- Guozden, T., Carbajal, J. P., Bianchi, E., y Solarte, A. (2020). Optimized balance between electricity load and wind-solar energy production. *Frontiers in Energy Research*, 8, 16. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00016>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of hydrology*, 349(3-4), 350-363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Hoste, G., Dvorak, M., y Jacobson, M. Z. (2009). Matching hourly and peak demand by combining different renewable energy sources. Sanford University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Janicke, H., Bottinger, M., Mikolajewicz, U., y Scheuermann, G. (2009). Visual exploration of climate variability changes using wavelet analysis. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 15(6), 1375-1382. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.197>
- Lau, K. M., y Weng, H. (1995). Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bulletin of the American meteorological society*, 76(12), 2391-2402. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076%3C2391:CSDUWT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076%3C2391:CSDUWT%3E2.0.CO;2)
- Lee, G., Gommers, R., Waselewski, F., Wohlfahrt, K., y O'Leary, A. (2019). PyWavelets: A Python package for wavelet analysis. *Journal of Open-Source Software*, 4(36), 1237. <https://doi.org/10.21105/joss.01237>
- Liu, Y., Zeng, Z., Xu, R., Ziegler, A. D., Jerez, S., Chen, D., ... y Yang, X. (2022). Increases in China's wind energy production from the recovery of wind speed since 2012. *Environmental Research Letters*, 17(11), 114035. DOI 10.1088/1748-9326/ac9cf4
- Lledó, L., Bellprat, O., Doblas-Reyes, F. J., y Soret, A. (2018). Investigating the effects of Pacific sea surface temperatures on the wind drought of 2015 over the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(10), 4837-4849. <https://doi.org/10.1029/2017JD028019>

- Malloy, J. W., Krahenbuhl, D. S., Bush, C. E., Balling Jr, R. C., Santoro, M. M., White, J. R., ... y Cervený, R. S. (2015). A surface wind extreme (“wind lulls” and “wind blows”) climatology for central North America and adjoining oceans (1979–2012). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(3), 643–657. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0009.1>
- McVicar, T. R., Van Niel, T. G., Li, L. T., Roderick, M. L., Rayner, D. P., Ricciardulli, L., y Donohue, R. J. (2008). Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophysical Research Letters*, 35(20). <https://doi.org/10.1029/2008GL035627>
- McVicar, T.R., M.L. Roderick, R.J. Donohue, and T.G. Van Niel, 2012: Less bluster ahead? Ecohydrological implications of global trends of terrestrial near-surface wind speeds. *Ecohydrol.*, 5(4), 381–388. <https://doi.org/10.1002/eco.1298>
- Minola, L., Azorin-Molina, C., Guijarro, J. A., Zhang, G., Son, S. W., y Chen, D. (2021). Climatology of near-surface daily peak wind gusts across Scandinavia: observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(7), e2020JD033534. <https://doi.org/10.1029/2020JD033534>
- Naizghi, M. S., y Ouarda, T. B. (2017). Teleconnections and analysis of long-term wind speed variability in the UAE. *International Journal of Climatology*, 37(1), 230–248. <https://doi.org/10.1002/joc.4700>
- Orlov, A., Sillmann, J., y Vigo, I. (2020). Better seasonal forecasts for the renewable energy industry. *Nature Energy*, 5(2), 108–110. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0561-5>
- Phillips, R. C., y Gorse, D. (2018). Cryptocurrency price drivers: Wavelet coherence analysis revisited. *PloS one*, 13(4), e0195200. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195200>
- Polanco-Martínez, J. M., Fernández-Macho, J., y Medina-Elizalde, M. (2020). Dynamic wavelet correlation analysis for multivariate climate time series. *Scientific Reports*, 10(1), 21277. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77767-8>
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J., Bukovsky, M. S., Leung, L. R., y Sakaguchi, K. (2020). Climate change impacts on wind power generation. *Nature Reviews Earth y Environment*, 1(12), 627–643. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0101-7>
- Ren21, R. (2020). *Global Status Report, 2020*.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., ... y Woollen, J. (2011). MERRA: NASA’s modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24(14), 3624–3648.
- Roderick, M. L., L. D. Rotstain, G. D. Farquhar, and M. T. Hobbins, 2007: On the attribution of changing pan evaporation. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17403. <https://doi.org/10.1029/2007GL031166>
- Soberanis, M. E., y Mérida, W. (2015). Regarding the influence of the Van der Hoven spectrum on wind energy applications in the meteorological mesoscale and microscale. *Renewable Energy*, 81, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.048>
- Staffell, I., y Green, R. (2014). How does wind farm performance decline with age?. *Renewable energy*, 66, 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.041>
- Staffell, I., y Pfenninger, S. (2016). Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*, 114, 1224–1239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>
- Torrallba, V., Doblás-Reyes, F. J., MacLeod, D., Christel, I., y Davis, M. (2017). Seasonal climate prediction: a new source of information for the management of wind energy resources. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(5), 1231–1247. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0204.1>
- Utrabo-Carazo, E., Azorin-Molina, C., Serrano, E., Aguilar, E., Brunet, M., y Guijarro, J. A. (2022). Wind stilling ceased in the Iberian Peninsula since the 2000s. *Atmospheric Research*, 272, 106153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106153>
- Utrabo-Carazo, E., Azorin-Molina, C., Aguilar, E., y Brunet, M. (2023). A Spectral Analysis of Near-Surface Mean Wind Speed and Gusts Over the Iberian Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 50(8), e2023GL103323. <https://doi.org/10.1029/2023GL103323>
- Watson, S. (2019). Quantifying the variability of wind energy. *Advances in Energy Systems: The Large-scale Renewable Energy Integration Challenge*, 355–368. <https://doi.org/10.1002/9781119508311.ch21>

- Wohland, J., Folini, D., y Pickering, B. (2021). Wind speed stilling and its recovery due to internal climate variability. *Earth System Dynamics*, 12(4), 1239-1251. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1239-2021>
- World Wind Energy Association. (2015). New record in worldwide wind installations. *WWEA Bull*, (1), 4-5.
- Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., Yang, L., Chen, A., Ju, K., ... y Wood, E. F. (2019). A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, 9(12), 979-985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
- Zha, J., Shen, C., Li, Z., Wu, J., Zhao, D., Fan, W., ... y Deng, K. (2021). Projected changes in global terrestrial near-surface wind speed in 1.5° C–4.0° C global warming levels. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114016. DOI 10.1088/1748-9326/ac2fdd

ANALYSIS OF WIND SPEED VARIABILITY IN CENTRAL ARGENTINA USING WAVELETS

ABSTRACT: This study analyses wind speed variations and explores sources of predictability for different sites in central Argentina over the 1980-2022 period. For these purposes, spectral, trend and correlation analysis tools were implemented to reanalysis-derived data. Wind speed time series show a non-stationary behaviour. That means a lack of significant and persistent cycles throughout the length of the timeseries. Wind speed timeseries exhibit long-term trends, but non-significant in most of the cases. The Antarctic Oscillation and Blob climatic oscillations stand out as potential predictors of wind speeds. The Antarctic Oscillation shows negative correlations with wind speeds mainly during summer, fall, and spring; while Blob shows positive correlations during spring for the southernmost sites. Wavelet coherency analysis, however, show that relationships between wind speeds and these climate indices occur in spectral bands that do not dominate the power spectrum of wind speeds: wavelet power spectrum shows that the variability of wind speed timeseries is concentrated in cycles spanning from one to three years (approximately), while relationships with climate indices occur over longer cycles (> 4 years).

Keywords: wind speed, climate variations, wavelets.

DISEÑO PRELIMINAR PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PARA INDUSTRIA EN ZONA AISLADA, UTILIZANDO ENERGÍA EÓLICA E HIDRÓGENO

Fernando Tilca¹, Juan Mathisson^{2,3}, Marcelo Balbi³, Humberto Bárcena¹

¹Facultad de Ciencias Exactas, INENCO - UNSa. CP 4400 Salta. fertilca@gmail.com

²Miembro No Permanente del INENCO - UNSa.

³INENCO - UNSa. Tel. 0387-4255579

RESUMEN: Se describen los primeros pasos para cumplir con un principio fundamental de la eficiencia energética, que es producir la electricidad cerca del punto de consumo y de la disponibilidad de la fuente energética. Si las industrias pudieran generar su propia electricidad, conseguirían cierta independencia de la provisión de energía, y a su vez, no estarían dependiendo de las variaciones de precio de la energía eléctrica proveniente de la red. Pero, además, podrían instalarse en zonas donde no llega la red y hay abundante fuente de energía renovable. Se considera como industria gran consumidora a una siderúrgica y al pueblo aledaño a ella, como fuente de energía a la generación eléctrica mediante parque eólico y como almacenamiento para subsanar la generación intermitente del viento, al hidrógeno. Se realiza un primer dimensionamiento que consiste en el diseño del parque eólico, de 185 MW en zona cercana a San Julián, provincia de Santa Cruz, contempla que su generación satisfaga la demanda de energía, teniendo en cuenta la parte necesaria para producción de hidrógeno mediante 10 electrolizadores de 16 MW, del depósito de hidrógeno y de 7 celdas de combustible de 10 MW cada una.

Palabras clave: energía eólica, hidrógeno, parque eólico e hidrógeno.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica mediante parques eólicos en la Patagonia presenta como un fuerte obstáculo, el que los lugares de consumo están alejados cientos o miles de km de los lugares de generación. Por otro lado, cabe destacar que la capacidad de las líneas de alta tensión (300 a 500 kV) del Sistema Argentino De Interconexión (SADI) de esta zona se encuentra cubierta, lo que es un problema, dado que las construcciones de nuevas líneas de estas características tienen un costo alto. Por estos motivos es que se propone investigar la factibilidad que tiene la generación eléctrica utilizando la fuente eólica, para satisfacer consumos en el mismo lugar de generación. En este caso, para una industria que tiene un consumo eléctrico elevado, considerando todo en un sistema aislado, es decir sin estar conectado al SADI. Además, se tiene en cuenta la existencia de puertos de ultramar si la producción industrial, para la que se utilizaría la energía generada en el lugar, fuese su destino la exportación.

BREVE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

(Dalton et al., 2009) en el artículo *Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel*, presenta un análisis de la viabilidad técnica y financiera de suministro de energía solo de red, solo de Fuente de Energía Renovable (FER) y de red/FER para un hotel (más de 100 camas) conectado a red. Llegó a la conclusión que, a precios de la energía del año 2004, aun cuando sólo con FER se puede satisfacer potencialmente el 100 % de la demanda de energía, no es viable económicamente; que, en este marco, los sistemas eólicos de potencia mayor que 1 MW son mejores desde lo económico. Obtiene también que para 4 años después, cuando el precio de la energía se cuadruplicó, el híbrido red/FER es más económico en un lapso de 20 años que el sistema solo de red.

Concluye que las FER son tanto técnica como económicamente viables como una adición al suministro conectado a red.

(Sgobba & Meskell, 2019) en el artículo *On-site renewable electricity production and self consumption for manufacturing industry in Ireland: Sensitivity to techno-economic conditions* (Producción de electricidad renovable in situ y autoconsumo para la industria manufacturera en Irlanda: sensibilidad a las condiciones tecno-económicas), hacen un estudio para determinar la viabilidad técnica y económica de la producción de energía renovable in situ a partir de energía solar y eólica, para autoconsumo de una fábrica en Irlanda. Concluyen que sería atractiva solo si se cumplen las tres condiciones siguientes: i) un largo período de retorno de la inversión; ii) un subsidio importante (por ejemplo, impuesto al carbono); iii) mejoras tecnológicas que conducirán a una reducción proporcional en CapEx. Además, que es poco probable que se cumplan las tres condiciones, por lo que este tipo de generación renovable distribuida no tiene factibilidad económica en Irlanda.

(Diab et al., 2016) en el artículo *An environmentally friendly factory in Egypt based on hybrid photovoltaic /wind/diesel/battery system* (Una fábrica respetuosa con el medio ambiente en Egipto basada en un sistema híbrido fotovoltaico/eólico/diésel/batería), hacen una evaluación técnico-económica del uso de un sistema híbrido, de 250 kW de potencia total, para satisfacer las necesidades de energía eléctrica de una fábrica; mencionan que en Egipto, hasta la fecha del artículo, no se han realizado intentos a gran escala para utilizar energías renovables. Concluyen que el sistema híbrido de energía renovable que consta de 60 kW de paneles fotovoltaicos, 100 kW de turbinas eólicas, 40 kW de generadores diésel, 50 kW de convertidores de potencia y 600 baterías resulta ser la configuración híbrida óptima, en la que la fracción de EERR es el 73%, siendo el consumo de combustible de 35850 litros/año. El consumo de la fábrica es de 1 MWh/día, y de casas aledañas de 0,1 MWh/día. Los datos de viento y de radiación solar los obtienen de la base de datos de la NASA publicados en la web. Costo de la energía es 0,19 US\$/kWh. En nuestro caso, no se plantea un sistema de acumulación con baterías.

METODOLOGÍA

Se determinarán consumos mensuales y anuales de energía de industrias, especialmente siderúrgicas, en base a datos publicados por CAMMESA en su página web. Luego se calculará la Producción Anual de Energía (PAE) de parques eólicos de distintas potencias, en base a un Factor de capacidad (Fc) que sea razonable para el lugar escogido, que es en las cercanías de San Julián, provincia de Santa Cruz. Con esta estimación se determinará la potencia a instalar del parque eólico para satisfacer la demanda de la industria que se elegirá y de la cantidad de hidrógeno. Se elige este lugar por su cercanía al puerto, además que para este lugar se dispone de datos de viento medidos.

La potencia del parque eólico determinada es el punto de inicio para la elección final del tamaño del parque, tal que permita elegir la mejor configuración que garantice un autoconsumo y minimice la capacidad necesaria de acumulación de hidrógeno, es un proceso iterativo entre las variables de diseño. Además del factor de potencia, se analizará la variación interanual de la velocidad de viento, durante 20 años, mediante la generación de una serie de datos de velocidad y dirección de viento extendida mediante el método MCP (Medir, Correlacionar, Predecir). Con ello se podrá visualizar el comportamiento de la generación eléctrica del parque eólico y de la capacidad de respuesta necesaria del sistema de electrolizador-acumulador-celda, frente a los ciclos climatológicos durante un período razonable de vida del proyecto.

Hecho esto, se propondrá un tipo de equipamiento de planta de hidrógeno, para asegurar la provisión de energía eléctrica para las horas del día en que no haya viento, como también para cuando la velocidad del viento no sea suficiente para que la generación mediante el parque eólico no pueda satisfacer la demanda, de manera de complementarla con la generación utilizando en estos casos la fuente hidrógeno.

ELECCIÓN DE LA INDUSTRIA Y DEL LUGAR

En la tabla 1 se muestran los consumos mensuales de energía eléctrica de algunas industrias que son de interés para este trabajo. Los datos de consumo se obtuvieron de la página oficial de CAMMESA. (*Informe Anual* | CAMMESA, n.d.).

De la tabla 1 se selecciona para este trabajo, la siderúrgica cuyo consumo anual es de 554669 MWh/año. A esta elección se le debe sumar el consumo de energía de las personas (y sus familias) que trabajarán en la industria del lugar, más lo necesario de servicios públicos y otros, a saber: 300 casas, escuela, centro de salud, policía, alumbrado público, centro de esparcimiento, etc.

Tabla 1: Consumo de energía eléctrica de algunas empresas. Datos: página web CAMMESA, 2022.

EMPRESA	MWh/mes	MWh/año
Transclor S.A. - Planta Pilar	20703	248437
Profertil S.A.- Pta. B.Blanca	23523	282274
Loma negra - Planta L`Amali	23917	287005
Siderar Planta Ind. San Nicolás	46222	554669
Siderca S.A. - Pta. Campana	70316	843790
Acindar Planta V. Constitución	107251	1287016
Aluar S.A. Autogenerador renovables	218628	2623534

Para obtener una demanda total anual se debe estimar el consumo por casa (considerando calefacción con energía eléctrica), en 1000 kWh/mes, totalizando así 12000 kWh/año promedio por casa. Para el total de casas consideradas, se tiene un consumo de 3600 MWh/año. En cuanto a los demás servicios mencionados, se supone un consumo de 6400 MWh/año, lo que da como resultado 10000 MWh/año, que sumado al consumo de la siderúrgica seleccionada, da un total de 564,7 GWh/año, es decir, 1,55 GWh/día.

RENDIMIENTOS DEL EQUIPO DE HIDRÓGENO

El equipo de Hidrógeno está formado por electrolizador, depósitos de hidrógeno y celdas de combustible. El electrolizador necesita, en su entrada, energía eléctrica para producir determinada cantidad de kg de H₂ a su salida. Luego, la celda de combustible utiliza ese H₂ para producir energía eléctrica en su salida.

Rendimiento de la energía eléctrica para producir H₂ en el electrolizador:

56,0 kWh producen 1 kg de H₂ → 56,0 kWh/kgH₂.

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow H_2O(l) \quad \Delta H_f^\circ = -285,8 \frac{kJ}{mol}$$

$$1000 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 \text{ mol de agua}}{18 \text{ gr}} * \frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 55,56 \frac{\text{mol de agua}}{\text{l H}_2\text{O}}$$

De esta manera, la energía que debe suministrarse para disociar 1 litro de agua en sus componentes es:

$$E = 55,56 \frac{\text{mol}}{\text{l H}_2\text{O}} * \left(-285,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) = -15.879 \frac{\text{kJ}}{\text{l H}_2\text{O}} \quad \text{o} \quad -4,40 \frac{\text{kWh}}{\text{l H}_2\text{O}}$$

Para un litro de agua se tiene entonces:

$$2 H_2O(l) \rightarrow 2 H_{2(g)} + O_{2(g)}$$

$$\frac{55,56 \frac{\text{mol}}{\text{l}}}{2} = 27,78 \frac{\text{mol O}_{2(g)}}{\text{l}} * \frac{32 \text{ g}}{\text{mol O}_{2(g)}} = 888,96 \frac{\text{g O}_{2(g)}}{\text{l H}_2\text{O(l)}}$$

$$55,56 \frac{\text{mol}}{\text{l}} = 55,56 \frac{\text{mol H}_2(\text{g})}{\text{l}} * \frac{2 \text{ gr}}{\text{mol H}_2(\text{g})} = 111,12 \frac{\text{g H}_2(\text{g})}{\text{l H}_2\text{O}(\text{l})}$$

Por lo tanto: Si obtenemos 0,111 g de H₂ por cada litro de H₂O, entonces para obtener 1 kg de H₂, serán necesarios 10 litros de H₂O aproximadamente.

Así también, si se necesitan 4,4 kWh para 1 litro de H₂O, y tomando una eficiencia media del electrolizador del 80 %, se tiene que serán necesarios 55 kWh para obtener 1 kg de H₂.

Rendimiento del H₂ a energía eléctrica en la celda de combustible:

1,0 kgH₂ produce 25,0 kWh, con una eficiencia del 75% con respecto a 33,3 kWh/kgH₂, valor del Punto de Combustión Inferior (PIC) de la molécula de hidrógeno (Alvarado Flores et al., 2019).

Es decir, que para obtener 25,0 kWh a la salida de la celda de combustible, se necesita tener 56,0 kWh a la entrada del electrolizador, por lo tanto, el rendimiento η del equipo de H₂ es:

$$\eta = \frac{25,0 \text{ kWh/kgH}_2}{56,0 \text{ kWh/kgH}_2} = 0,45 \left(\frac{\text{kWh salida de celda}}{\text{kWh entrada electrolizador}} \right) \quad (2)$$

HIPÓTESIS DE TRABAJO

La hipótesis es que se puede tener un día completo sin viento (de los datos surge que es menor que un día), entonces toda la energía de un día, necesaria para satisfacer la demanda, la debe proveer el equipamiento de H₂. Se calcula a continuación, la cantidad de masa de H₂ necesarios a la entrada de la celda, y luego la cantidad de energía eléctrica que se necesita a la entrada del electrolizador.

Para calcular los kg de H₂ necesarios por día, a la entrada de la celda de combustible, se tiene como dato la demanda de energía diaria, indicada en (1), que es 1,55 GWh/día = 1.547.100 kWh/día. Entonces:

$$\frac{1.547.100 \text{ kWh/día}}{25 \text{ kWh/kgH}_2} = 61.884 \left(\frac{\text{kgH}_2}{\text{día}} \right) \quad (3)$$

La determinación de la cantidad de energía eléctrica que se debe tener a la entrada del electrolizador para la producción de esta cantidad de masa de H₂, se realiza entonces:

$$61.884 \left(\frac{\text{kgH}_2}{\text{día}} \right) * 56 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kgH}_2} \right) = 3.465.504 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{día}} \right) = 3,5 \left(\frac{\text{GWh}}{\text{día}} \right) \quad (4)$$

Una alternativa a tener en cuenta para analizar en el futuro es que el depósito de H₂ puede ser mayor a lo necesario para almacenar los 61.884 kgH₂, indicado en (3), de manera que parte de la energía generada por el parque eólico sea para producir H₂, una parte cada día más no el total en un día.

DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO DE H₂

La densidad del H₂ (gaseoso) a 700 bar es 40 kgH₂/m³ (Perry, 1992). El volumen mínimo de H₂ será, por lo tanto:

$$61.884 \frac{\text{kgH}_2}{40 \left(\frac{\text{kgH}_2}{\text{m}^3} \right)} = 1.547 \text{ m}^3 \quad (5)$$

El almacenamiento se realizará en tubos de 10 m de largo por 0,91 m de diámetro, entonces el volumen de cada tubo es igual a 6,5 m³. Por lo tanto, la cantidad de tubos necesarios es de 179 unidades (volumen mínimo), totalizando 46546 kgH₂ para las condiciones de presión mencionadas.

En un principio, se considera la cantidad de tanques (tubos) indicada en los cálculos. Pero en base al análisis de generación de energía eólica, se estima que, para un mejor aprovechamiento de la energía del viento, el almacenamiento puede duplicarse o incluso hasta triplicarse. Esta es una de las cuestiones que debe analizarse en el futuro. El arreglo de colocación de los tanques de almacenamiento se muestra en la figura 1.

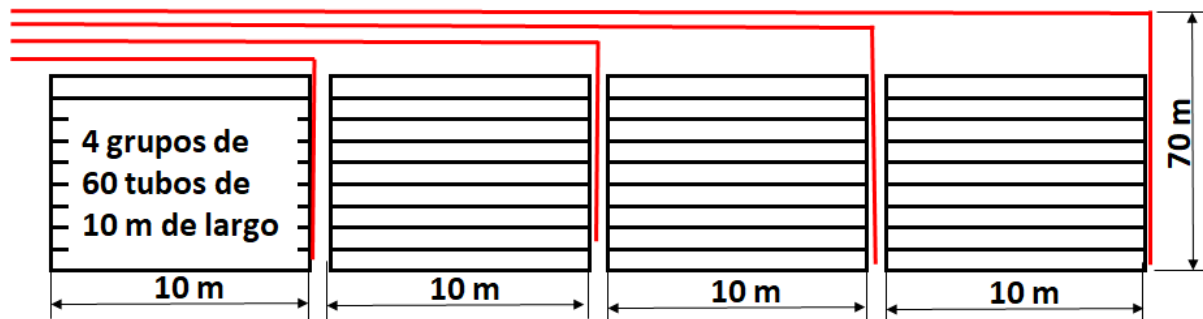


Figura 1: esquema de ubicación de los tanques de almacenamiento de H₂. Esto representa en tamaño, un terreno de 45 m x 70 m, es decir 3150 m² de superficie, como mínimo. Elaboración propia.

Para disminuir los inconvenientes debidos a las intermitencias del viento, se prevé que la celda de combustible reaccione entregando más, o menos, potencia eléctrica según estas intermitencias y variaciones en la demanda. En primera instancia se estima un funcionamiento de base, del 20% de su capacidad.

DETERMINACIÓN DE CANTIDAD DE ELECTROLIZADORES

Los electrolizadores seleccionados en esta primera instancia de dimensionamiento son dos (luego se elegirá uno de ellos), ambos con las características: marca Mac Phy (McPhy, 2023), modelo McLyzer 3200 de 16 MW de potencia cada uno. Rango de operación de 10 a 100 %. Producción media de H₂ 3200Nm³/h.

Con esta potencia de electrólisis, y teniendo en cuenta que 1 kg de H₂ ocupa un volumen de 11,93 Nm³H₂ (metro cúbico normal de hidrógeno gaseoso; 'normal' se refiere a las condiciones normales de 0°C y 1 atm), se realizan los cálculos para obtener los valores de la tabla 1. Recordemos, se necesitan 61.884 kgH₂/día para cubrir el 100% de la demanda de energía de un día completo sin viento. La cantidad de electrolizadores para generar el H₂ necesario, en un día, será la indicada en la tabla 2.

Tabla 2: Cantidad de días para generar el total requerido de 61.884 kgH₂ con dos electrolizadores.

Fuente: The McPhy Group (McPhy, 2023)

	Producción media de H ₂ por electrolizador	Demanda	Cantidad de electrolizadores
Electrolizador 1, Mac Phy, modelo McLyzer 3.200 de 16 MW.	3.200 Nm ³ /h = 7.6800 Nm ³ /día	6.438 kgH ₂ /día	61.884 kgH ₂ /día
			1

Pero, no se necesita producir la totalidad del H₂ en un día, ya que el depósito de H₂, no estará al 0% de la carga. Incluso como se dijo antes, debe decidirse por un depósito de H₂ dos o tres veces más grande que el calculado más arriba, lo que incluirá, probablemente, proveer de este gas para la producción de acero verde, lo que va más allá de los alcances de este artículo. En la tabla 3, se muestra la cantidad de días para generar los 61.884 kgH₂ según la cantidad de electrolizadores.

Tabla 3: Cantidad de días para generar la demanda de H₂, según cantidad de electrolizadores.

Producción media de H ₂ por electrolizador	Demanda	Cantidad de electrolizadores	Días para satisfacer la demanda
6.438 kgH ₂ /día	61.884 kgH ₂	1	9,6

	2	4,8
	3	3,2
	4	2,4
	5	1,9
	6	1,6
	7	1,37

DETERMINACIÓN DE CANTIDAD DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Para la conversión de H₂ en energía eléctrica, se utilizarán celdas de combustible tipo PEM (Membrana de intercambio protónico). Poseen las siguientes características de operación: El electrolito sólido reduce los problemas de corrosión; mantenimiento mínimo; temperatura de operación baja; rápido inicio de funcionamiento, en pocos segundos ya están aportando energía a la red eléctrica, 360 V de tensión de salida en corriente continua.

Se realiza un arreglo de celdas de 10 MW cada una. Gracias a la configuración escalable de las mismas, podemos colocar tantas de ellas como sean necesarias. La máxima producción diaria de energía eléctrica de cada celda, funcionando a su potencia nominal es de 240 MWh/día. Puesto que, como se dijo, la demanda de energía es de 1.547 MWh/día, la cantidad de celdas de combustible será de 6,4, es decir 7 celdas de combustible de 10 MW cada una. Se debe determinar las potencias pico de consumo a lo largo del día, para comprobar que esta cantidad será suficiente. Este es un trabajo a realizar en el futuro desarrollo de este proyecto de investigación.

POTENCIA INSTALADA DEL PARQUE EÓLICO

Para la determinación de la potencia instalada del parque eólico, se estimará la PAE para un valor razonable del Factor de Capacidad (Fc) para la Patagonia, que se toma de 50%. En la tabla 4 se muestra la PAE en función de la potencia a instalar del parque.

Para satisfacer la demanda indicada en (1), de 564,7 GWh/año, se observa de la tabla 3 que la potencia a instalar del parque puede ser, en principio, de 130 MW.

Tabla 4: Producción Anual de Energía en función de la potencia instalada del parque eólico

Potencia Instalada (MW)	Producción Anual de Energía (GWh)
50	219.0
60	262.8
70	306.6
120	525.6
130	569.4
140	613.2
160	700.8

El Fc se define como la PAE dividido por la energía generada durante un año a potencia nominal del aerogenerador.

$$F_c = \frac{\text{PAE} \left(\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right)}{\text{Potencia nominal (MW)} * 8.760 \left(\frac{\text{horas}}{\text{año}} \right)} \quad (6)$$

Es un número global que no describe la variabilidad de generación que puede presentar la velocidad de viento en un determinado sitio. Dependiendo de la característica del recurso eólico se pueden caracterizar variabilidades en el valor de la velocidad de viento diurna, estacionales, mensuales e interanuales, siendo esta última analizada a través de un estudio a largo plazo.

El sostenimiento en el tiempo, tanto de velocidades por encima de la velocidad promedio anual o por debajo, puede generar condiciones de necesidad de reserva de hidrógeno en situaciones de escasez de generación eléctrica para abastecer la demanda, como exceso de energía cuando el acumulador esté lleno y la demanda esté abastecida totalmente por el parque eólico.

Por tanto, teniendo en cuenta lo anterior, se analizan tres escenarios posibles a analizar de tamaño de parque eólico: 130 MW, 180 MW y 300 MW; es decir, 0%, 38% y 130% por encima de la potencia teórica necesaria, para un Fc de 50%.

El sistema propuesto para que el equipo eólico-H₂ permita el autoconsumo de la industria debe considerar las siguientes hipótesis de diseño:

- Con el propósito de tener en régimen continuo el sistema de electrolizador y celda de combustible, se propone abastecer siempre un porcentaje de la demanda con electricidad generada en la celda de combustible.
- El resto de la demanda debe ser abastecida directamente por el parque eólico
- De existir sobrante de generación, abasteciendo 100% la demanda, el excedente se vuelca al electrolizador para la generación de hidrógeno
- La celda de combustible siempre se alimentará del acumulador de hidrógeno
- Si la generación es inferior a la fracción directa que el parque eólico debe abastecer, la celda de combustible debe aumentar su producción hasta completar la demanda
- Si la generación del parque eólica es nula, la celda de combustible debe tener la capacidad de abastecer 100% la demanda y el acumulador no debe vaciarse.
- Para el cálculo no se restringe la producción de hidrógeno cuando existe exceso en la generación y el acumulador se encuentra lleno.

DISEÑO DEL PARQUE EÓLICO

Se tiene en cuenta que el uso de hidrógeno como vector en el abastecimiento de la energía eléctrica de una demanda determinada y utilizando como fuente la energía eólica, presenta desafíos importantes para el mantenimiento de dicha demanda.

Teniendo en cuenta las hipótesis de trabajo descritas anteriormente, la metodología para el desarrollo del layout y configuración final del parque es la siguiente:

- 1- Análisis del recurso eólico seleccionado. En este caso Puerto Deseado
- 2- Análisis de la complejidad del terreno para la determinación de la representatividad de los valores de serie de datos anemométricos
- 3- Selección de un área hipotética para contener un parque de entre 130 MW y 300 MW.
- 4- En base a la caracterización del recurso eólico, principalmente velocidad de viento extremo y curva de Weibull, selección de al menos 2 modelos de máquinas eólicas.
- 5- Extensión de datos eólicos a largo plazo, período 1/1/2000 a 31/12/2019 para la visualización de los ciclos climatológicos
- 6- Cálculo de la PAE y de la producción horaria durante toda la extensión de datos de torre.
- 7- Determinación, para cada configuración, del tamaño de acumulador mínimo para que el sistema sea autoconsumo para la industria.
- 8- Una tarea a futuro es realizar el análisis horario de la respuesta que debe tener la configuración del sistema que alimentará la demanda de la industria.

El análisis de los datos anemométricos y el diseño del parque eólico se lleva a cabo utilizando el software windPRO de EMD (EMD, n.d.), con licencia académica para la Universidad Nacional de Salta.

Los datos de viento corresponden a los registrados por 5 anemómetros ubicados: 2 a 60 msns, 2 a 40 msns y 1 a 20 msns. Una veleta ubicada a una altura de 38 msns y un termómetro a 4 msns. La torre se ubica en un terreno a 115 msnm. El período de medición abarca desde el 8/5/2009 al 7/1/2013 con frecuencia diezminutal.

El sitio elegido tiene un recurso eólico con una velocidad predominante del oeste, típico de la zona patagónica, donde se caracteriza por el “viento del oeste”. Este recurso presenta una turbulencia que es significativamente diferente entre el oeste y el este, debido a que el océano se encuentra cercano, sin embargo, es muy poco significativa la producción de energía eléctrica con vientos del este.

Se presenta una distribución de velocidades de viento que se ajusta a una distribución de Weibull con un valor de 2,8 en el factor de forma y un valor de 12,8 m/s en el factor de escala, con una velocidad media de 11,4 m/s, todos valores a 112 msn para el período de medición.

En la elección de las máquinas se tuvo en cuenta la posibilidad de buscar dos características: capacidad de soportar vientos fuertes como los de este sitio y visualizar dos tipos de curva de potencia, principalmente comparando los parámetros de velocidad nominal y la pendiente de la curva de potencia.

Se prueban dos tipos de máquinas, Vestas V105 3.45 MW Clase IA y Vestas V136 4.5 MW Clase IIA, a 112 m de altura de buje, ambas máquinas clasificadas según IEC 61400-1 4ª edición, 2019. Por tanto, el análisis estadístico del recurso eólico se muestra para esa altura de buje. Dichas máquinas están presentes en el catálogo de Vestas (Vestas, 2023) en el momento de la elaboración de este estudio y sus curvas en el catálogo de WindPRO, curvas proporcionadas por Vestas a EMD (EMD, n.d.).

La velocidad nominal de V105 es 13 m/s y su potencia nominal es 3045 kW, en cambio la V136 tiene una velocidad nominal de 11 m/s y una potencia nominal de 4500 kW. Por lo tanto, se tiene que la pendiente de la curva de potencia de la V136 es mayor que la V105, permitiendo que a menores velocidades se genere mayor potencia. En este caso, también se puede decir, que poca variación de velocidad de viento, cuando éste es menor a 11 m/s, generará en el parque una alta variabilidad de generación.

Durante el análisis de las velocidades de viento a largo plazo, se halla una anomalía en la misma para el año 2016, específicamente entre mayo de 2016 y noviembre del mismo año, teniendo un mínimo de 7,81 m/s de valor de velocidad media mensual en el mes de mayo de 2016. Dicha anomalía corresponde, en la región patagónica, entre un 10% y un 15% menor para la velocidad media anual, de acuerdo al informe de tendencia de vientos de AWS (*AWS Truepower Releases 2016 Annual & Q4 Wind Trends Bulletins*, n.d.).

Durante los 20 años analizados, para el caso de Vestas V105, 130 MW potencia total a instalar, la producción del parque se mantiene en el entorno de 66 GWh mensuales; sin embargo, en el período mencionado de 2016, llega a valores de 38,8 GWh mensuales, manteniéndose durante 1 mes, por debajo de 50 GWh la suma mensual móvil, es decir, 75% del promedio anual, como se observa en la figura 2.

Esa anomalía no se visualiza en ningún momento de la ventana de 20 años. Por esa razón, dado que la metodología utilizada para determinar el tamaño del acumulador y el tamaño del parque es impactada por este suceso, no se lo incluye en el análisis. Esto es debido a que se están visualizando, al menos, dos situaciones, la búsqueda de una metodología de análisis que permita desarrollar un parque eólico para autoconsumo y respaldo en hidrógeno como vector energético y de almacenamiento y tener en cuenta que situaciones extremas pueden generar un sobredimensionamiento que pueda inviabilizar el proyecto. Mientras que, en la operativa, una situación anómala no está prevista y puede ser contenida mediante otras acciones en la operación y gestión de la demanda. Se analizan 6 configuraciones de parque y se muestran en las tablas 5, 6 y 7.

Las pérdidas por estela aumentan en función de la cantidad de aerogeneradores colocados, dado que el área a utilizar para el desarrollo del parque en terreno es la misma para todos los casos. A su vez se tienen en cuenta los valores de pérdidas e incertidumbre sugeridos en (Mathisson, 2023).

El segundo análisis que se realiza es el máximo tamaño del acumulador para que, durante el período de 20 años considerado, toda la demanda sea totalmente abastecida por el sistema eólico-electrolizador-celda. La siguiente tabla muestra para cada configuración (1 a 6) el tamaño mínimo necesario, para dos niveles de alimentación de la demanda por parte de la celda de combustible, 10% y 20% de la demanda.

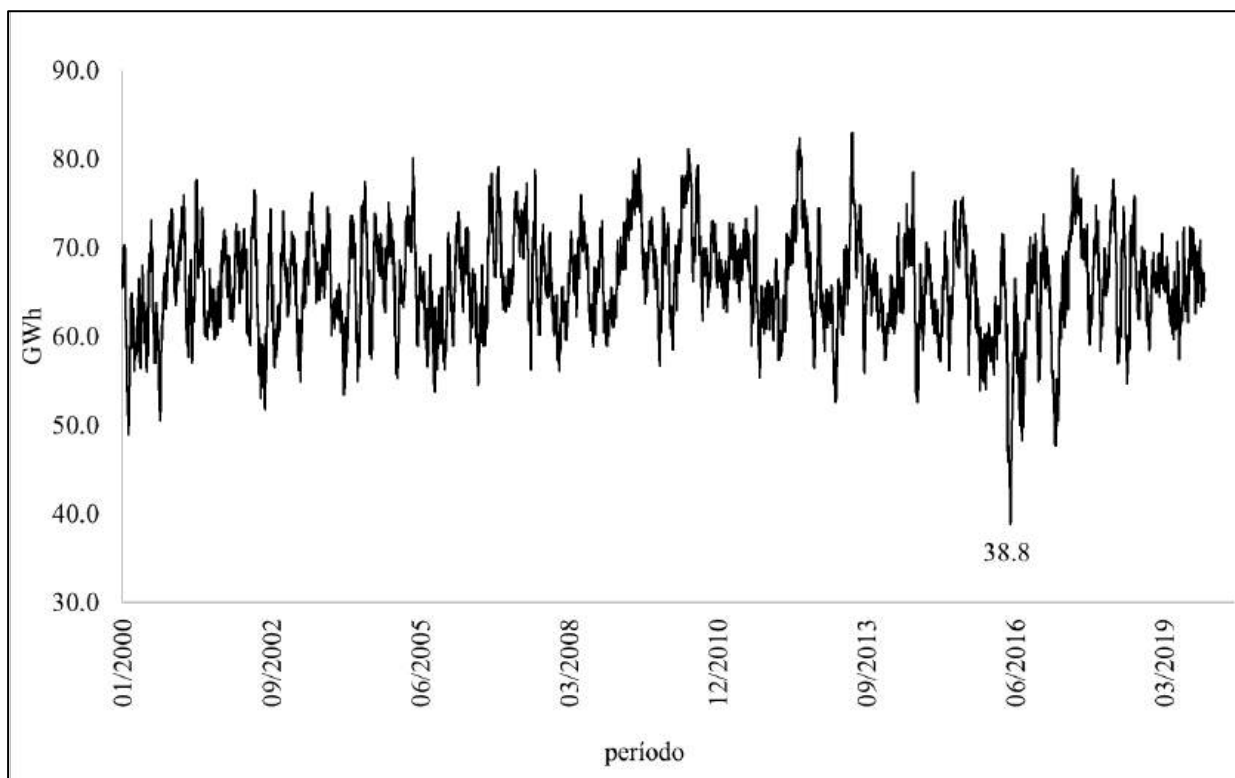


Figura 2: Suma móvil mensual de la producción de energía eléctrica horaria entre 1/1/2000 y 31/12/2019 en GWh para parque de 130 MW potencia instalada y aerogeneradores Vestas V105 y altura del buje 112 msns. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Características de aerogeneradores usados para el diseño de las configuraciones de parques consideradas. Fuente: Elaboración propia.

Configuración	Modelo Aerogenerador	Potencia nominal aerogenerador (kW)	Diámetro rotor (m)	Altura buje (m)	Cantidad	Potencia total parque (MW)
1	V105	3450	105	112	38	131
2	V105	3450	105	112	53	183
3	V105	3450	105	112	87	300
4	V136	4500	136	112	30	135
5	V136	4500	136	112	41	185
6	V136	4500	136	112	67	302

Tabla 6: Configuraciones 1 a 3 para Vestas V105 a 112 m de altura de buje.

Descripción	unidad	Parque potencia MW		
		130	180	300
Configuración	-	1	2	3
PAE bruta	GWh/año	812.9	1128.7	1840.4
Pérdidas por estela	%	1.2	1.5	2.3
Otras pérdidas	%	7.3	7.3	7.3
Incertidumbres	%	5.1	5.2	5.3
P50	GWh/año	744.2	1030.6	1666.9
P84	GWh/año	706.5	977.7	1579.7
P90	GWh/año	695.6	962.4	1554.6
P50	%	64.8	64.3	63.4
P84	%	61.5	61.0	60.1
P90	%	60.6	60.1	59.1

Tabla 7: Configuraciones 4 a 6 para Vestas V136 a 112 m de altura de buje.

Descripción	unidad	Potencia parque, MW		
		130	180	300
Configuración	-	4	5	6
PAE bruta	GWh/año	883	1203	1951
Pérdidas por estela	%	0.9	1.2	1.7
Otras pérdidas	%	7.3	7.3	7.3
Incertidumbres	%	4.7	4.7	4.8
P50	GWh/año	811	1102	1779
P84	GWh/año	773	1051	1694
P90	GWh/año	762	1036	1670
P50	%	68.6	68.2	67.3
P84	%	65.4	65.0	64.2
P90	%	64.5	64.1	63.2

Se puede apreciar en la tabla 8, que el aumento de la participación de energía eléctrica a partir de la celda de combustible en la demanda total requiere un mayor volumen de acumulador, para cualquiera de las configuraciones analizadas.

Tabla 8: Tamaño del acumulador para cada configuración, valores en $kg \cdot 10^{-3}$. Elaboración propia.

Configuración	10%	20%
1	567.0	1339.8
2	173.7	208.4
3	79.7	84.6
4	271.5	366.2
5	122.9	133.9
6	62.7	64.6

A su vez, se advierte que, para una misma potencia instalada, por ejemplo, al comparar 1 con 4, 2 con 5 y 3 con 6, en ambas condiciones (10% y 20%), el modelo V136 requiere un menor tamaño de almacenamiento. Si se toma como base el menor de los tamaños calculados, en este caso, $x=10\%$, configuración 6, se obtiene la siguiente tabla 9, la cual representa el tamaño relativo del acumulador comparado con la unidad de 62700 kg de H_2 .

Tabla 9: Tamaño relativo del acumulador según configuración de parque eólico (unidad es igual a 62700 kgH_2). Fuente: elaboración propia.

Configuración	10%	20%
1	9.04	21.37
2	2.77	3.32
3	1.27	1.35
4	4.33	5.84
5	1.96	2.14
6	1.00	1.03

Teniendo en cuenta que se parte de la base de un depósito de 46456 kgH_2 , tal cual se describe anteriormente, y, a su vez, se considera la posibilidad de ampliar el volumen de acuerdo con el recurso eólico y la configuración del parque, se tiene que en base a los cálculos realizados la configuración número 5 (180 MW, V136 a 112 m altura buje) ofrece un diseño adecuado. Si bien la configuración 3 ofrece una solución de menor almacenamiento, es un parque con un diseño de 81 aerogeneradores, siendo el layout que ofrece mayores pérdidas por estela. Un parque de esas características, comparado

con el resto de las configuraciones, presentará mayores pérdidas y riesgo de disminución de la vida útil de las máquinas, sumado a una mayor inversión en mantenimiento, tanto por la más alta probabilidad de roturas como el número total de aerogeneradores.

El otro aspecto considerado es el exceso de energía cuando el parque opera a potencia nominal. Se puede visualizar que los parques de 300 MW (configuraciones 3 y 6) muestran una menor capacidad, sin embargo, en el análisis detallado durante los 20 años, para un acumulador de 62700 kgH₂, se logra estar lleno durante períodos considerables de tiempo.

En la figura 3 se puede visualizar la variación en el tiempo durante todo el período considerado, del tamaño mínimo necesario en kgH₂ que debe tener el acumulador, para siempre abastecer la demanda.

Se aprecia que, en el primer cuatrimestre de 2013, se llega al máximo de acumulador de 133930 kg H₂. Si se triplica la unidad de acumulación mínima de 179 tubos mencionada anteriormente, se tiene un valor total de acumulación de 139368 kg H₂, mayor al máximo calculado. Por lo tanto, el parque de la configuración 5, permite un manejo adecuado hasta un 20% de participación de la demanda por parte de la generación eléctrica de la celda, presenta bajas pérdidas por estela, menor cantidad de aerogeneradores y un tamaño de acumulador previsto en este trabajo. La configuración final del parque se muestra en la figura 4. Se puede ver que los aerogeneradores se ubican en zonas de velocidades de viento altas preferentemente, teniendo en cuenta las recomendaciones de distancias expresadas en (Mathisson, 2023), de 9 diámetros en la dirección predominante del viento (275°) y 7 diámetros en la diagonal menor de la elipse.

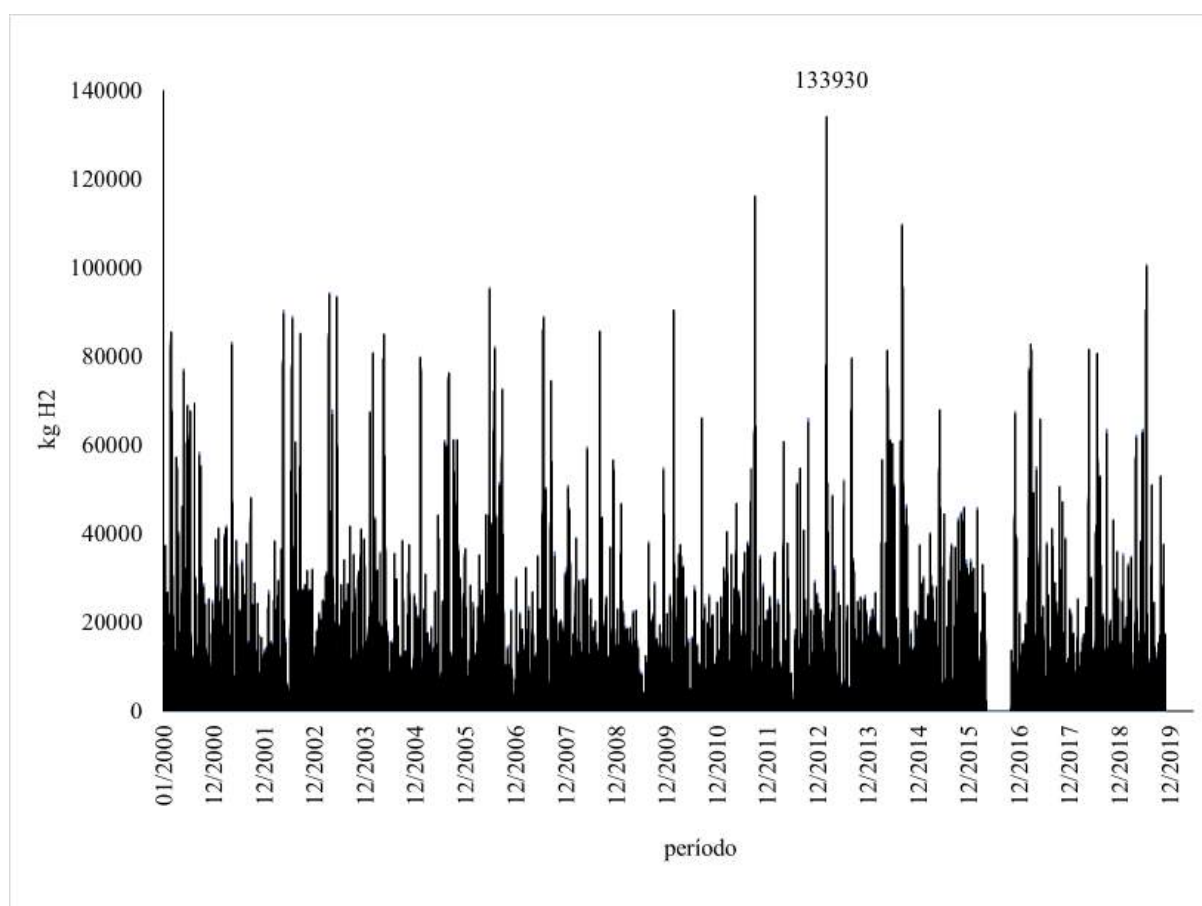


Figura 3: Simulación del tamaño mínimo necesario en kgH₂ que debe tener el acumulador, para la configuración 5 y 20% participación en la demanda, para el período 1/1/2000 al 31/12/2019. Fuente: Elaboración propia.

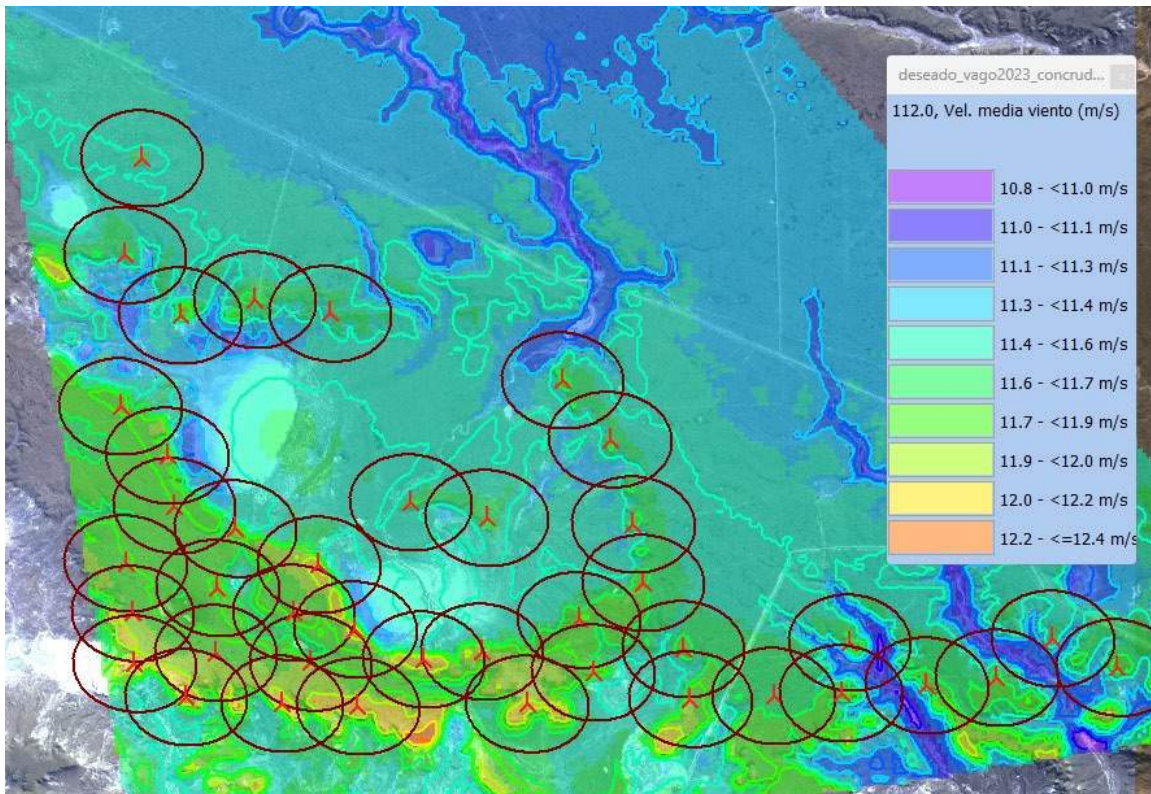


Figura 4: Parque 180 MW, aerogenerador Vestas V136 4.5 MW, altura buje 112 m. Se muestra mapa de velocidades medias y leyenda, en m/s. Fuente: Elaboración propia en WindPRO.

ESQUEMA UNIFILAR DE LA TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

El esquema unifilar de la figura 5 corresponde al sistema de generación de energía del parque eólico de este trabajo, como al equipo de hidrógeno, que alimenta la demanda de energía ya descrita. Se tiene en cuenta que pueden haber días de escaso o nada de viento. Se considera un equipo de electrolizadores para generar Hidrógeno y tenerlo como reserva para luego alimentar las celdas de combustible para generar energía eléctrica (en corriente continua) y luego mediante procesos de transformaciones energéticas, poder abastecer la demanda, de manera de brindar un servicio eléctrico sin interrupciones.

El esquema consta de, en primer lugar, un parque eólico, como se dijo, de 180 MW, donde cada uno de los mismos tiene una tensión alterna de salida de 800 V. La energía generada es colectada en un determinado punto donde se coloca una estación transformadora para elevar la tensión a un valor de 33 kV nominales y transmitirla a los centros de consumo. Inmediatamente después de la transformación, se plantea un nodo donde se tiene una derivación para el centro de consumo (Industria y el pueblo) y también para alimentar el electrolizador. La derivación para el centro de consumo se transmite en media tensión de 33 kV. Para alimentar el electrolizador hacen falta tensiones en baja (380 V), por lo tanto, se plantea una subestación transformadora de reducción de tensión de 33/0,38 kV.

El equipo de electrolizadores genera hidrógeno, es el que se dirige hacia los depósitos indicados en el esquema mediante un rectángulo. Luego, utilizando el hidrógeno, las celdas de combustible generan energía eléctrica en corriente continua. Con inversores eléctricos de CC a CA se vuelve a obtener energía en corriente alterna a valores nominales de 380 V, y luego se planifica poner una subestación transformadora para poder elevar la tensión a 33 kV. Como último tramo se proyecta unir los dos centros de generaciones, tanto del eólico como del que proviene de las celdas de combustible, para plantear una última subestación transformadora, la cual abastecerá a la demanda de energía.

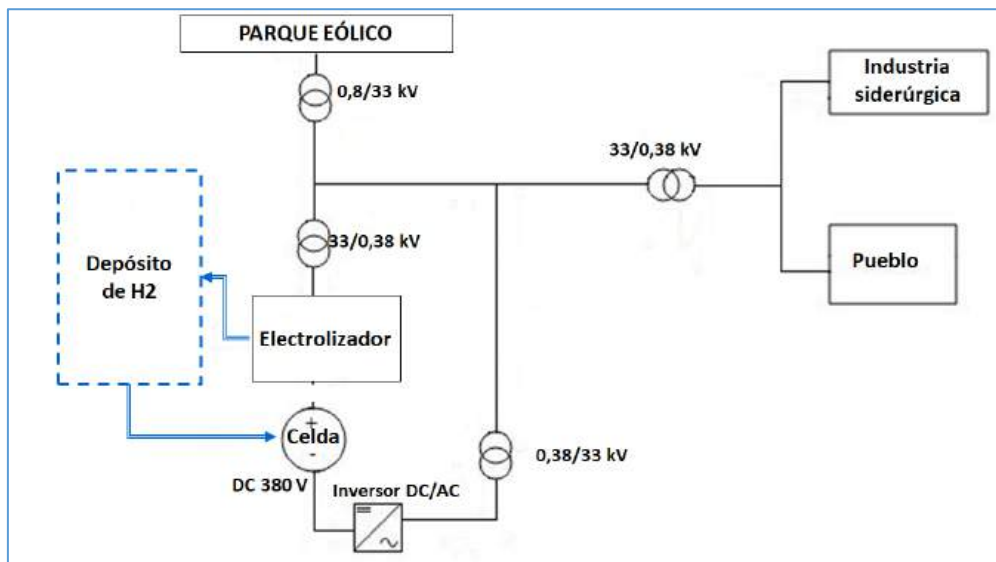


Figura 5: Esquema unifilar, simplificado, de las transmisiones eléctricas.

ACTIVIDADES A FUTURO

En este trabajo no se describe cómo se utilizará el oxígeno generado por la electrólisis. Es un tema que se debe encarar, previsto en el proyecto de investigación en curso.

La cantidad de hidrógeno calculada será utilizada solo como combustible para las celdas. En el alcance de este trabajo, no se contempla hidrógeno como agente reductor de la industria de fabricación de hierro.

La electrónica que deberá manejar la red eléctrica, tendrá que ser capaz de leer el valor de la demanda y tomar ese valor de energía del parque eólico si hay suficiente viento, del parque eólico y la generación eléctrica del equipo de hidrógeno si la producción del parque no es la suficiente. También deberá enviar energía eléctrica a los electrolizadores cuando la producción del parque supere la demanda, y en caso que el equipo de hidrógeno no requiera de energía, enviarla para producción de acero verde mediante electrólisis directa del mineral de hierro. Lo mencionado es parte del proyecto de investigación en curso.

CONCLUSIONES

Se realizó un primer diseño de producción y consumo de energía de un sistema aislado de gran porte, utilizando fuente renovable como lo es el viento para generación eléctrica, mediante un parque eólico de 180 MW, para los requerimientos de una industria siderúrgica. Esto incluye también la primera propuesta del equipo de hidrógeno, formado por electrolizadores, depósitos de hidrógeno y celdas de combustible.

Si bien este trabajo es un primer diseño de toda una planta completa de producción y consumo, se pudo diseñar el parque eólico con la potencia instalada requerida para el consumo previsto, obtener la cantidad de electrolizadores en función del tiempo en que se desea recargar los depósitos de gas hidrógeno, realizar el pre-diseño del depósito de hidrógeno con la posibilidad de aumentar su capacidad, y elegir celdas de combustible de 10 MW de potencia.

Los trabajos a futuro incluyen determinar la electrónica que manejará la red eléctrica, capacidad de los depósitos de hidrógeno (y su optimización) para la fabricación de acero verde mediante electrólisis directa del hierro, la determinación de costos, entre otros.

REFERENCIAS

Alvarado Flores, J. J., Ávalos Rodríguez, M. L., & Rutiaga Quiñones, J. G. (2019). Celdas De Combustible Como Elementos Potenciadores Para Un Desarrollo Energetico Sustentable.

- Ariema. (2023). Almacenamiento de Hidrógeno - ARIEMA. <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- AWS Truepower releases 2016 Annual & Q4 Wind Trends Bulletins. (n.d.). Retrieved August 14, 2023, from <https://www.windpowerengineering.com/aws-truepower-releases-2016-annual-q4-wind-trends-bulletins/>
- Dalton, G. J., Lockington, D. A., & Baldock, T. E. (2009). Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel. *Renewable Energy*, 34(4), 955–964. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.08.012>
- Diab, F., Lan, H., Zhang, L., & Ali, S. (2016). An environmentally friendly factory in Egypt based on hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery system. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3884–3894. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.008>
- EMD. (n.d.). windPRO - The Best Software for Wind Farm and PV Project Design EMD International. Retrieved August 14, 2023, from <https://www.emd-international.com/windpro/>
- Estif. (2023). Home. <http://www.estif.org/solarkeymarknew/>
- Informe Anual | CAMMESA. (n.d.). Retrieved August 14, 2023, from https://cammesaweb.cammesa.com/informe-anual/?doing_wp_cron=1692036610.5994539260864257812500
- Mathisson, J. F. (2023). Propuesta de valoración de pérdidas e incertidumbres de producción anual de energía en parques eólicos. Universidad Nacional de Salta.
- McPhy. (2023). McPhy: clean hydrogen production and distribution equipment. <https://mcphy.com/en/?cn-reloaded=1>
- Perry III, R. H. (1992). *Manual del Ingeniero Químico*/Robert Perry, Down Green, James o Maloney.
- Sgobba, A., & Meskell, C. (2019). On-site renewable electricity production and self consumption for manufacturing industry in Ireland: Sensitivity to techno-economic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 207, 894–907. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.260>
- SynerHy. (2023). Métodos de almacenamiento del hidrógeno | SynerHy. <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
- Vestas. (2023). 4 MW Platform | Vestas. <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform>

PRELIMINARY DESIGN FOR ENERGY PRODUCTION FOR OFF-GRID INDUSTRY, USING WIND ENERGY AND HYDROGEN

ABSTRACT. We described the first steps to comply with a fundamental principle of energy efficiency, which is to produce electricity close to the consumption points and the availability of the energy source. If the industries could generate their own electricity, they would achieve a certain independence from the energy supply network, and in turn, they would not be dependent on the variations prices of electrical energy coming from the network. But, in addition, they could be installed in areas where the network does not reach and there is an abundant source of renewable energy. A steel mill and the town surrounding it are considered a large consumer industry, electricity generation through a wind farm as a source of energy and hydrogen as storage to correct intermittent wind generation. The design of the wind farm contemplates that its generation meets the demand for energy, taking into account the part necessary for hydrogen production; a first sizing of the hydrogen tank, number of electrolyzers and fuel cells.

Keywords: wind energy, hydrogen, wind farm.

VIVIENDAS EN VULNERABILIDAD ENERGÉTICA. CASO DE ESTUDIO EN USHUAIA, PATAGONIA, ARGENTINA

Camila Andrea Ludueña¹, Consolación Ana Acha Román¹

¹Escuela técnica superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, España
Tel: (+34)623 038 068 e-mail: camilaludu@gmail.com

RESUMEN Este trabajo tiene por objetivo evaluar del comportamiento térmico y energético de dos viviendas ubicadas en la ciudad de Ushuaia, Patagonia, Argentina, construidas con una envolvente térmica ineficiente. Para dicha evaluación se ha encuestado a los hogares en aspectos técnicos y de percepción del confort. Por otro lado, se ha cuantificado el consumo energético y se han evaluado los valores monetarios en cuanto a la inversión que representa para los hogares. El consumo de gas se calcula entre 640 y 715 kWh/ m² por año para calefaccionar las viviendas, hacer uso del agua caliente sanitaria y cocinar. Dicho consumo se encuentra subsidiado por el estado en un 99,5%, aun así, las viviendas no alcanzan el confort térmico a lo largo del año; por tanto, requieren de estrategias para la gestión de la energía que expone a los hogares a una falta de confort térmico y una gran vulnerabilidad.

Palabras clave: Consumo energético. Vulnerabilidad energética. Confort térmico. Transmitancia térmica.

INTRODUCCIÓN

En Argentina, el gas natural es el principal combustible de uso residencial a nivel nacional, según información pública basada en encuestas sobre 31 aglomerados urbanos. Alrededor del 70,4% de los hogares están conectados a la red de gasoductos (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2018). Los hogares fuera de la red de gas natural utilizan principalmente gas envasado, y en menor cantidad leña, queroseno y electricidad como fuentes de energía térmica (A. D. González et al., 2007). De acuerdo con el censo nacional realizado durante el año 2022 el 87,3 % de los hogares de la ciudad de Ushuaia utilizan gas de red o electricidad para cocinar (*Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2023*) quedando fuera el porcentaje de viviendas que dependen de gas envasado u otros combustibles.

Debido a las diferencias climáticas dentro del país, las zonas más frías se han beneficiado de las subvenciones a la energía debido a su situación geográfica y, por tanto, a la alta demanda de calefacción. La ciudad de Ushuaia, ubicada en el extremo sur del país, siendo una de las localizaciones más frías ofrece el beneficio del subsidio para toda la población que no cuente con conexión a red de distribución de gas natural. Sin embargo, este sistema de gestión no ha permitido a la población desarrollar un sentido de conciencia energética y ambiental. Así, los hogares de ingresos medios o altos han sido, por años, los más beneficiados ya que no han tenido que modificar sus envolventes para hacerlas más eficientes (Filippín & Larsen, 2012).

Las metodologías de análisis del comportamiento térmico y energético de viviendas tanto ocupadas como desocupadas no ha tenido una gran variación en los últimos años, en muchos casos consiste en la caracterización de las envolventes y en la monitorización de los espacios interiores con el objetivo de cuantificar y cualificar los niveles de confort de los hogares y su relación con los elementos constructivos circundantes (Martín-Consuegra et al., 2021; Wang et al., 2023). La diferencia entre los casos de estudio

radica en la singularidad del contexto espacial, climático, cultural, energético y económico (Domínguez-Amarillo et al., 2018). Por tanto, si bien la metodología es replicable no así la forma posterior de intervenir. La riqueza de los resultados obtenidos en las evaluaciones consiste en la capacidad de profundizar en momentos concretos de la historia de los edificios, los impactos sobre el confort y el consumo energético (de Frutos et al., 2021).

Por otro lado, la consideración e implementación de enfoques cualitativos (Gayoso Heredia et al., 2022) abre la puerta a la incorporación de aspectos subjetivos al estudio del confort y la exposición de los hogares a diferentes tipos de vulnerabilidades relacionados con la habitabilidad en su conjunto. La rehabilitación energética integral de viviendas, siendo uno de los objetivos urgentes en las agendas estatales (Ebrahimigharehbaghi et al., 2022) requiere de la comprensión del estado actual de las viviendas, no solo en cuanto a cuestiones materiales objetivas si no también a la consideración de percepciones y realidades diversas que en muchos casos quedan fuera de las políticas de actuación. Resulta imposible replicar y aplicar soluciones de rehabilitación sin considerar aspectos locales como, en este caso, la gestión energética y las características de tipos constructivos utilizados derivados de un contexto social y cultural.

El objetivo del presente artículo es evaluar el comportamiento térmico y energético de dos casos de estudio ubicados en la ciudad de Ushuaia, Patagonia, Argentina. Los hogares presentan tipologías constructivas ineficientes que se dan, en parte, debido a que las subvenciones sobre la energía consumida son muy elevadas. Por tanto, no representan una imposibilidad económica para los hogares como para que se considere imprescindible la mejora de las características térmicas.

Por otro lado, reflejar la singularidad del contexto energético en el que se enmarca este estudio cuyo fin propone la futura creación de actuaciones de rehabilitación acordes a las necesidades concretas del entorno para paliar la vulnerabilidad energética en la que pudieran estar los hogares tanto en el presente como el futuro.

CASO DE ESTUDIO

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger, la región presenta un clima “ET” tundra polar (Peel et al., 2007) y según la normativa IRAM 11.603 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2012) corresponde a la zona bio ambiental VI (muy fría). El clima en esta región podría presentar temperaturas invernales que ocasionalmente bajan a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperaturas medias máximas en verano de unos $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los valores de grados días son mayores a $2730\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Como es de esperar, debido a la hostilidad del clima, es necesario mantener los espacios habitables calefaccionados la mayor parte del año utilizando diferentes recursos energéticos (A. González, 2014). Por tanto, existe un sistema de subsidios para quienes no están conectados a la red de gasoductos (Ente regulador del gas, 2018). Las viviendas estudiadas se encuentran ubicadas en un barrio situado a tres kilómetros del centro de la ciudad, el cual cuenta con un acceso complejo que requiere un alto mantenimiento tanto en invierno como en verano debido a la falta de infraestructura conformándose un contexto urbano con grandes dificultades, sobre todo durante el periodo invernal.

La vivienda 1 (Figura 1y Figura 2) fue originalmente construida como refugio para reubicar a las familias en situación de emergencia en cuanto al acceso a la vivienda. Ha sido escogida por ser una de las unidades que aún mantiene las características originales casi en su totalidad, tanto en dimensiones como en materiales. Es uno de los edificios que menos intervenciones ha sufrido a lo largo del tiempo, lo que permite establecer una situación real y muy desfavorable al mismo tiempo como punto de partida.

La vivienda 2 (Figura 3 y Figura 4) es producto de la autoconstrucción y ha sido modificada a lo largo del tiempo, por tanto, cuenta con diferentes materiales empleados. Ha sido escogida como representante del

conjunto de viviendas comúnmente construidas en la zona, ya que, gran parte de ellas se componen de sistemas y materiales similares. Tanto en la V1 y V2, el perfil ocupación se compone de cuatro miembros, dos personas adultas y dos menores.



Figura 1 Fachada principal. Vivienda 1.

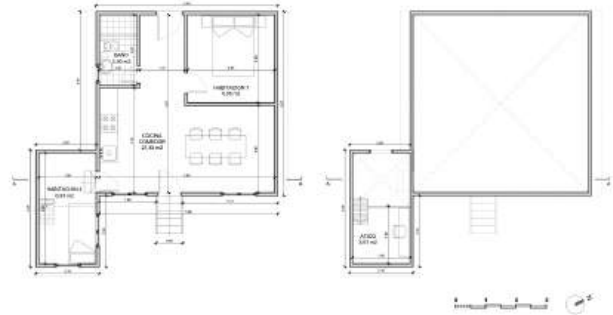


Figura 2 Planos de la vivienda 1.



Figura 3 Fachada principal. Vivienda 2.

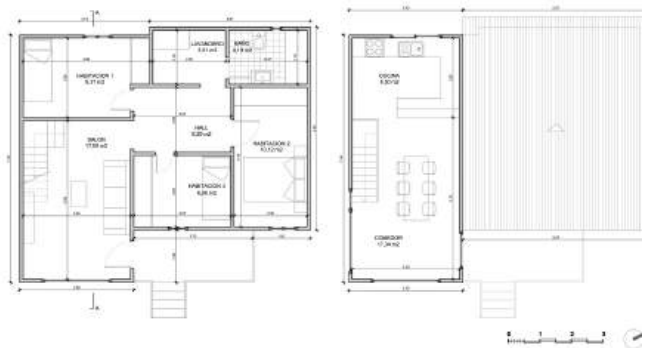


Figura 4 Planos de la vivienda 2.

METODOLOGIA

Para poder caracterizar y analizar el comportamiento térmico de las viviendas en su totalidad, se han desarrollado dos tareas principales que consisten en la realización de una encuesta cerrada en formato de entrevista y una monitorización higrotérmica durante dos años (2021 – 2023) de cada uno de los hogares. En el presente artículo se compartirán los análisis desarrollados a partir de las entrevistas.

Se han realizado visitas en las viviendas con dos objetivos, por un lado, obtener información para la representación gráfica y, por otro lado, obtener información relacionada con el uso de la vivienda y la percepción del confort con el fin de comprender la situación global en la que viven las familias en relación con la gestión energética. Con tal objetivo se ha desarrollado una entrevista guiada por una encuesta en la que se han realizado preguntas relativas a: 1. Datos generales de la vivienda, 2. Características constructivas, 3. Instalaciones (HVAC), 4. Datos de consumo, 5. Hábitos de consumo y uso de la vivienda y 6. Percepción del confort y otras consideraciones.

La duración de la visita supero una hora ya que, previo al desarrollo de la entrevista, se realizaron fotografías del inmueble y se llevó a cabo un levantamiento métrico con el fin de poder realizar la planimetría completa de cada uno de los hogares.

RESULTADOS

En el presente apartado se expondrá el análisis desarrollado a partir de la información obtenida de las entrevistas y visitas realizadas en la vivienda 1 y la vivienda 2.

Entrevistas

Se presenta un resumen sobre los aspectos más relevantes obtenidos en el proceso de entrevista. Como se puede observar, el gas es predominante en cuanto a la energía utilizada tanto para calefacción como para cocinar. Por otro lado, si bien el tamaño de la vivienda varía, el resto de los aspectos como la materialidad de la envolvente y los hábitos de uso son similares.

Las características detalladas en la *Tabla 1* fueron incluidas por considerarse imprescindibles a la hora de conocer el comportamiento térmico y energético de una vivienda ocupada. Por otro lado, hay una serie de preguntas relacionadas con la percepción del confort y con la percepción de mejoras por parte de los ocupantes que aporta información interesante a la hora de incorporar aspectos cualitativos en la caracterización de los hogares.

En cuanto a los resultados de la encuesta de la V1, se puede concluir que tanto el uso de la vivienda como la percepción del confort difiere por varios aspectos, por un lado, el espacio de uso común es más pequeño y en él se desarrollan la mayor cantidad de actividades cotidianas incluyendo las actividades de cocina. Lo cual genera una necesidad de hacer uso de la ventilación natural (30 minutos diarios). Otro aspecto relevante, expresado en la visita, es la reciente incorporación de cielorraso en el salón con el objetivo de reducir el volumen a calefaccionar. Si bien se expresa estar en confort térmico durante el invierno, se menciona durante la entrevista que el grado de infiltraciones de aire es elevado y que, al no existir recibidor de acceso a la vivienda, la apertura de puertas genera pérdidas térmicas abruptas ocasionando constantes incomodidades. Si bien dicen lograr alcanzar el confort, las condiciones actuales no resultan del todo adecuadas y la exposición a extremos térmicos puede darse repetidas veces en un día.

En el caso de la V2, el uso de los espacios es diferente debido al tamaño y los hábitos de uso cotidianos. Aun así, expresan la necesidad de poder mantener la vivienda a una temperatura adecuada en su totalidad. En este caso, no se calefaccionan todas las salas al mismo tiempo si no, al momento de hacer uso de ellas. La gestión de la calefacción es similar a la V1 ya que en ambos casos se reduce la temperatura o se apagan los equipos de climatización en momentos de ausencia de ocupación. Esta gestión de la calefacción tiene por objetivo el ahorro energético, pero exponiendo al hogar a una falta de confort térmico cotidiana ya que se requiere calentar el aire interior de los espacios repetidas veces en un solo día.

En la encuesta se ha evidenciado que los hogares no consideran que tengan un gasto económico excesivo en energía lo cual actúa en detrimento a la creación de conciencia ambiental y mejora de hábitos de uso y consumo por parte de los usuarios. Aun así, son conscientes del gasto económico que implicaría excederse del valor subsidiado ya que ambas viviendas cuentan con estrategias de gestión de la calefacción en las diferentes estaciones del año.

Tabla 1 Resultados de las encuestas.

Vivienda	V1	V2
Área (m ²)	43,6	83,6
Régimen de tenencia	Propiedad	Propiedad
Número de ocupantes	4	4
Confort declarado en invierno	Si	No
Confort declarado en verano	Si	No
Uso de la ventilación natural (min/día)	30 min. Mientras cocina	No ventilan a diario
Sistema de calefacción	Calefactor tiro balanceado	Calefactor tiro balanceado
Fuente utilizada para calefacción	Gas	Gas
Sistema de agua caliente sanitaria	Calentador	Termo
Fuente utilizada para agua caliente sanitaria	Gas	Electricidad
Sistemas utilizados para cocinar	Cocina y horno	Cocina y horno
Fuente utilizada para cocinar	Gas	Gas
Ventanas en las que hay infiltración de aire	Salón	Ninguna
Ventanas en las que hay condensación	Salón	Cocina
¿Qué mejoraría de su vivienda para estar en confort todo el año?		
Requiere	Mas calor en invierno	-
Calentar rápidamente	Baño	-
Mantener caliente	Salón	La vivienda entera
Agua caliente	-	Aumentar la cantidad
Ventanas	Aumentar la entrada de luz solar	-
¿Considera que paga demasiado en energía?	No	No

Características térmicas de las envolventes

Los sistemas de construcción utilizados en la región tienen poco que ver con el clima donde se ubican, debido a la falta de resistencia e inercia térmica en las envolventes. En cuanto a la estructura, existe una marcada tendencia al uso de marcos de madera y/o perfiles metálicos, aislados con lana de vidrio y revestidos de chapa metálica en el exterior y de cartón-yeso y/o placas de madera en el interior (Tabla 2). Una de las razones por las que se eligen estos sistemas constructivos es la rapidez del montaje, lo que permite aprovechar sobre todo las estaciones de primavera y verano para la construcción. La falta de adaptación de las construcciones al clima de Ushuaia en combinación con la falta de conexión de gas natural por red expone a los hogares a una vulnerabilidad energética.

En los casos de estudio, las viviendas se encuentran elevadas del terreno. La V1 se compone de estructura de madera, revestimiento al exterior de chapa metálica y al interior de placas de cartón yeso, aislamiento en cubierta y muros de 5 cm de lana de vidrio. Cuenta con una habitación adosada, construida a posteriori, la cual se compone de estructura de madera y tableros de partículas como revestimiento tanto interior como exterior, no cuenta con aislamiento térmico. Todas las ventanas son de marco de madera y vidrio simple. No se utiliza aislamiento térmico en el suelo.

La V2 también ha sufrido reformas, el módulo antiguo se encuentra construido con estructura de madera, revestimiento al exterior de chapa metálica y al interior de placas de cartón yeso, aislamiento en cubierta y muros de 10 cm de lana de vidrio. El módulo nuevo utiliza los mismos materiales de revestimiento, pero empleando metal para la estructura. Se evidencian tres tipos de ventanas: [1] marco de metal y vidrio sencillo (8 mm), [2] marco de madera y vidrio sencillo (6 mm) y [3] marco de metal y vidrio doble con cámara de aire (6-10-6 mm). No se utiliza aislamiento térmico en el suelo. En la Tabla 3 se muestran los valores de transmitancia térmica para cada elemento de la envolvente y para cada una de sus composiciones. En cuanto a la transmitancia térmica, estas fueron calculadas por los investigadores una vez que se tuvo acceso a la información sobre el sistema constructivo utilizado y las características de los materiales.

Tabla 2 Materialidad utilizada en las viviendas de estudio.

Materiales	Espesor (m)	Conductividad térmica λ (W/m. K) (Instituto Eduardo Torroja, 2011)
Vivienda 1		
Acero galvanizado	0,004	50,00
Lana de vidrio	0,05	0,04
Tableros de OSB	0,015	0,13
Placa cartón yeso	0,018	0,18
Pie derecho de madera	0,08	0,23
Tablero de partículas	0,03	0,18
Suelo vinílico	0,007	0,17
Viga de suelo / cubierta	0,10	0,23
Suelo cerámico	0,01	1,30
Vivienda 2		
Acero galvanizado	0,004	50,0
Tableros de OSB	0,015	0,13
Lana de vidrio	0,10	0,04
Placa cartón yeso	0,018	0,18
Pie derecho de madera	0,08	0,23
Pilar/viga (metal)	0,08	50,0
Viga de cubierta (madera)	0,10	0,23
Viga de suelo (metal)	0,10	50,0
Piso flotante	0,06	0,24
Suelo cerámico	0,10	1,30

Tabla 3 Transmitancia térmica vivienda 1 y vivienda 2

Transmitancia térmica (U) ¹	Transmitancia térmica (U) ¹	
	Vivienda 1 (W/m ² K)	Vivienda 2 (W/m ² K)
Muro	0,92	0,53
	1,79	0,75
Cubierta	0,75	0,55
		1,06
Suelo	2,50	1,59
	2,88	2,35
Huecos	7,6	7,3
		6,2
		4,2

¹ Mas de un valor de transmitancia significa que hay más de una composición en la envolvente.

La norma IRAM 11.900 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2019) identifica cuatro niveles definidos por los valores de transmitancia térmica de paredes y techos (*Tabla 4*). Comparando los valores de las envolventes con los que exige la normativa, en ambos casos se mantienen entre el nivel A/B y C. El impacto de la calidad de las envolventes repercutirá directamente sobre la demanda y el consumo energético y sobre el confort térmico de los hogares.

Tabla 4 Valores de transmitancia térmica establecidos por la normativa local.

Transmitancia térmica (U)	Nivel A	Nivel A/B	Nivel B	Nivel C
Muro	0.27 W/m ² K	0.50 W/m ² K	0.72 W/m ² K	1.23 W/m ² K
Cubierta	0.23 W/m ² K	0.42 W/m ² K	0.61 W/m ² K	1.00 W/m ² K

En esta región, no se desarrollan fuertes políticas destinadas a mejorar las características térmicas de los edificios y la concienciación social sobre el consumo y la eficiencia energética. Para poder planificar y proponer alternativas de rehabilitación es imprescindible estudiar el estado actual de una forma detallada ya que las soluciones existentes en materia de rehabilitación energética no son fácilmente replicables en todos los contextos socioeconómicos y geográficos. La diversidad o falta de recursos puede dificultar la creación de planes sostenibles, apropiables y aplicables en ciudades como Ushuaia.

Consumo energético

Hasta el momento, este sector residencial ha estado utilizando el gas envasado y la madera como principales recursos de energía térmica. Como se ha mencionado anteriormente, el suministro de gas se encuentra subsidiado por el estado.

El subsidio estatal cubre el 99,5% del consumo energético dentro de un rango preestablecido. Los importes se dividen en dos períodos, verano: de octubre a abril, e invierno, de mayo a septiembre. Durante el verano el gobierno sólo subvenciona 240 kg por mes y durante el invierno 450 kg por mes, si los usuarios consumen más kg mensuales, deben pagar la diferencia consumida a un valor sin subsidio aplicado. La V1 consume el gas en formato de garrafas de 45 kg mientras que la V2 consume gas a granel ya que cuenta con un depósito de mayores dimensiones para ello.

Tabla 5 Valores de la energía con y sin subsidios¹.

	Garrafa (45 kg)	Granel (x kg)
Con subsidio	USD 0,30 \$ 90	USD 0,006 \$ 2
Sin subsidio	USD 55 \$ 16.300	Verano: USD 1,27 \$ 375 Invierno: USD 1,24 \$ 365

Estas viviendas utilizan el gas para calentar los espacios habitables, hacer uso de las cocinas y el agua caliente sanitaria. Los dispositivos para la calefacción más utilizados son unidades individuales con quemadores de gas que calientan el aire por intercambio de calor directo con la habitación a través de una

¹ Valores obtenidos el día 8 de agosto de 2023. 1 peso argentino (\$) = USD 294

lámina metálica. La instalación es sencilla y barata ya que sólo requiere una salida horizontal de los humos. Se venden en tres tamaños principales, pequeño de 2-3 kW, mediano de 3-4,5 kW y grande de 4,5-6 kW (Cardoso & González, 2019; Juanicó & González, 2008). En el caso de las viviendas de estudio, el sistema de calefacción consiste en unidades individuales de estufas con tiro balanceado previamente mencionadas.

Tabla 6 Consumo de gas propano expresado en kg y en kWh/m². Caso de estudio.

Consumo de gas propano							
Area	Verano		Invierno		Anual		
m ²	kWh/m ²	kg	kWh/m ²	kg	kWh/m ²	kg	
V1	43,6	290,2	945	422,2	1.375	712,4	2.320
V2	83,6	280,0	1.750	360,3	2.250	640,3	4.000

1kg de gas propano = 13,39 kWh

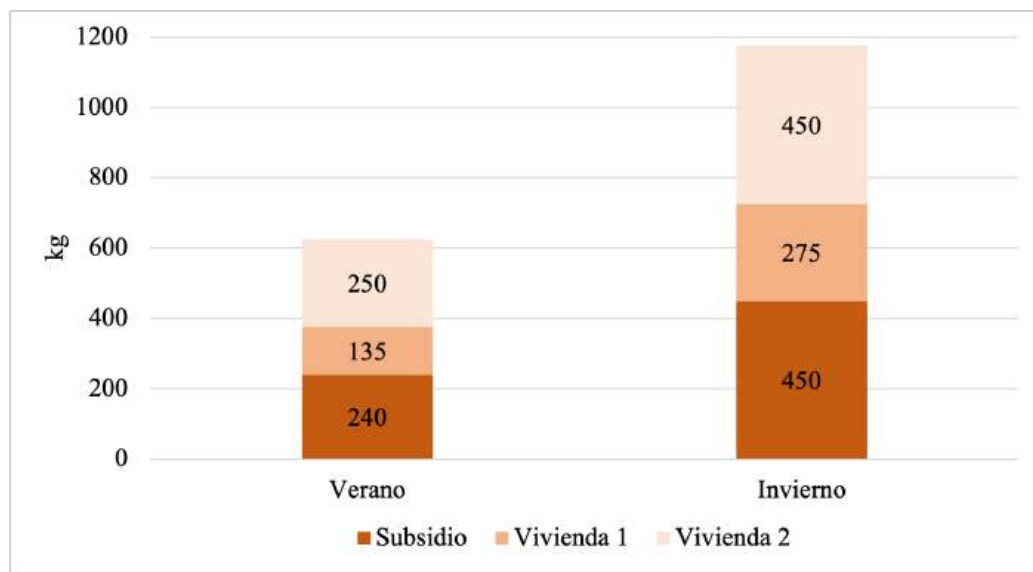


Figura 5 Consumo mensual de gas propano en el periodo de verano y de invierno.

La vivienda 1 consume 135 kg por mes durante el periodo de verano y 275 kg por mes durante el periodo de invierno. La vivienda 2 consume 250 kg por mes durante el periodo de verano y 450 kg por mes durante el periodo de invierno.

Tabla 7 Inversión económica por hogar expresada en moneda nacional (peso argentino) y moneda extranjera (USD).

Inversión económica por hogar				
	Area (m ²)	Verano	Invierno	Anual
V1	43,6	USD 6,3 \$ 1890	USD 9 \$ 2700	USD 15,3 \$ 4590
V2	83,6	USD 10,0 \$ 3360	USD 12 \$ 4000	USD 22 \$ 7360

Según se expresan los valores reflejados en la Tabla 7, la inversión monetaria realizada para un consumo de 712kWh/m² (V1) y 640,3 kWh/m² anual (V2) es muy bajo considerando el contexto climático en el que se sitúan las viviendas. En este caso, ninguna de las viviendas se excede de la cantidad de kg mensuales

por tanto se subsidia el 100% de los kilos consumidos en un 99,5%. Por otro lado, considerando la diferencia en m² entre una vivienda y la otra, los valores monetarios invertidos y el consumo anual no es tan dispar entre ellas dado que la composición material es prácticamente igual.

CONCLUSIONES

Aplicar metodologías existentes para conocer el comportamiento térmico y energético de viviendas vulnerables energéticamente en contextos climáticos extremos del sur global representa un aporte interesante considerando el contexto de cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles.

Según el análisis realizado, se puede concluir que el consumo energético es muy elevado debido a la falta de resistencia térmica de las envolventes. Por otro lado, como se expresa en las encuestas no se alcanza el confort térmico a pesar de consumir esa cantidad de energía. Según la entrevista realizada a los hogares, estos desarrollan estrategias para el uso de la calefacción con el objetivo de no excederse de la cantidad de kg de gas subsidiado. La posibilidad de mantener la vivienda en confort por largos periodos se ve incapacitada debido a la calidad de las envolventes.

El estado asume mediante los subsidios el riesgo de los hogares en caer en pobreza energética severa. Aun siendo una medida imprescindible para el cuidado de las familias, puede resultar insostenible a largo plazo. Si bien no ha sido posible establecer el porcentaje que representa el gasto en energía en la renta anual de los hogares, este dato tampoco sería significativo ya que el 99,5 % del valor final consumido lo asume el estado. Otro aspecto interesante sería la evaluación económica de lo que pudiera representar destinar presupuesto en la mejora de la transmitancia térmica de las viviendas subsidiadas con el objetivo de reducir la demanda energética.

El presente estudio concluye que la necesidad de desarrollar políticas para la rehabilitación integral de edificios en climas extremos fríos se hace cada vez más evidente en el contexto energético actual. Sea cual sea la gestión de la energía, toda actuación será de carácter preventivo considerando un futuro en el que el abastecimiento de energías no renovables en contextos alejados sea difícil de sostener.

En casos de estudio de estas características se debe considerar el clima de la zona, el comportamiento térmico de las envolventes y las subvenciones sobre la energía ya que son estas las que penalizan la demanda energética y no propician la intervención sobre las envolventes con el objetivo de mejorar su eficiencia.

AGRADECIMIENTOS

A las familias que han abierto las puertas de sus hogares y han aportado información valiosa para que el presente estudio se pudiera desarrollar.

REFERENCIAS

- Cardoso, M. B., & González, A. D. (2019). Residential energy transition and thermal efficiency in an arid environment of northeast Patagonia, Argentina. *Energy for Sustainable Development*, 50, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.03.007>
- de Frutos, F., Cuervo-Vilches, T., Alonso, C., Martín-Consuegra, F., Frutos, B., Oteiza, I., & Navas-Martín, M. Á. (2021). Indoor Environmental Quality and Consumption Patterns before and during the COVID-19 Lockdown in Twelve Social Dwellings in Madrid, Spain. *Sustainability*, 13(14), 7700. <https://doi.org/10.3390/su13147700>

- Domínguez-Amarillo, S., Fernández-Agüera, J., Sendra, J., & Roaf, S. (2018). Rethinking User Behaviour Comfort Patterns in the South of Spain—What Users Really Do. *Sustainability*, 10(12), 4448. <https://doi.org/10.3390/su10124448>
- Ebrahimiagharehbaghi, S., Qian, Q. K., de Vries, G., & Visscher, H. J. (2022). Municipal governance and energy retrofitting of owner-occupied homes in the Netherlands. *Energy and Buildings*, 274, 112423. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112423>
- Ente regulador del gas. (2018). *Informe ENARGAS 2018*. Ente Nacional Regulador del Gas.
- Filippín, C., & Larsen, S. (2012). Historical Consumption of Heating Natural Gas and Thermal Monitoring of a Multifamily High-Rise Building in a Temperate/Cold Climate in Argentina. *Buildings*, 2(4), 477–496. <https://doi.org/10.3390/buildings2040477>
- Gayoso Heredia, M., Sánchez, C. S.-G., Peiró, M. N., Fernández, A. S., López-Bueno, J. A., & Muñoz, G. G. (2022). Mainstreaming a gender perspective into the study of energy poverty in the city of Madrid. *Energy for Sustainable Development*, 70, 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.007>
- González, A. (2014). *Casas confortables con mínimo uso de energía* (El autor, Ed.).
- González, A. D., Carlsson-Kanyama, A., Crivelli, E. S., & Gortari, S. (2007). Residential energy use in one-family households with natural gas provision in a city of the Patagonian Andean region. *Energy Policy*, 35(4), 2141–2150. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.07.004>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). *IRAM 11603:2012 Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2019). *IRAM 11900. Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética* (Modificación N° 1 a la norma IRAM 11900:2017). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires.
- Instituto Eduardo Torroja. (2011). Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. *Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas*, 3, v2.1.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2018). *Indicadores de condiciones de vida de los hogares en 31 aglomerados urbanos.: Vol. 3 number 7*.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022: Resultados provisionales*. Instituto Nacional de Estadística y Censos, INDEC.
- Juanicó, L. E., & González, A. D. (2008). Savings on natural gas consumption by doubling thermal efficiencies of balanced-flue space heaters. *Energy and Buildings*, 40(8), 1479–1486. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.002>
- Martín-Consuegra, F., Osorio, R., de Frutos, F., Guerra, L., Alonso, C., Garzón, O. P., Oteiza, I., Duquino, L. G., Escorcía, O., & Frutos, B. (2021). *Analysis of comfort and indoor air quality, in social housing built during different periods (1918-2018) in Bogotá (Colombia)*.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1633–1644. <https://doi.org/10.1002/ppp.421>
- Wang, L., Wang, Y., Fei, F., Yao, W., & Sun, L. (2023). Study on winter thermal environment characteristics and thermal comfort of university classrooms in cold regions of China. *Energy and Buildings*, 291, 113126. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113126>

ENERGY VULNERABLE DWELLINGS. CASE STUDY IN USHUAIA, PATAGONIA, ARGENTINA

ABSTRACT This paper describes the assessment of the thermal and energy performance of two dwellings located in Ushuaia, Patagonia, Argentina. These dwellings were built with an inefficient thermal envelope. The evaluation includes a household survey, addressing technical aspects and perceptions of comfort. In addition, energy consumption has been quantified and the monetary values associated with it have been assessed in terms of the investment involved for the households. Gas consumption, covering heating, domestic hot water, and cooking, is estimated to be between 640 and 715 kWh/m² per year. Even though 99.5% of this consumption is subsidized by the state, residences still struggle to maintain thermal comfort throughout the year. Consequently, dwellings need energy management strategies, although these strategies expose households to compromised thermal comfort and increased vulnerability.

Keywords: Energy consumption. Energy vulnerability. Thermal comfort. Thermal transmittance.

INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AIRE EN UNA ESTUFA DE CURADO DE TABACO

Fabiana Altobelli¹, Miguel Condorí¹, Gonzalo Durán¹, Ileana Cruz¹

¹Grupo de Eficiencia Energética y Desarrollo Socio-Productivo (GEEDESP) – Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta

Tel. 0387-4258709 e-mail: fabi_altobelli@yahoo.com.ar

RESUMEN: En la región NOA de Argentina, y específicamente en la provincia de Salta, la actividad tabacalera se encuentra concentrada en la producción de tabaco Virginia, caracterizada por requerir una etapa de curado de las hojas en estufas. Se presentan los resultados obtenidos a partir de la intervención de una estufa de curado de tabaco de tipo *bulk-curing* ubicada en la localidad de Vaqueros, Salta. Un sistema de precalentamiento de aire conformado por colectores solares y recuperación de calor residual del humo del quemador fue instalado en los techos de la estufa. Los resultados de los ensayos preliminares demuestran que se puede lograr un ahorro estimado del orden del 40% comparando los valores de temperatura de salida del aire del sistema propuesto con lo requerido por el proceso de curado y el ambiente. Se evalúa financieramente los valores de la inversión con el ahorro en el consumo, refiriendo un tiempo de recupero inferior a las 3 campañas considerando tarifas internacionales de gas.
Palabras clave: tabaco, eficiencia energética, energía solar.

INTRODUCCIÓN

La actividad tabacalera en la provincia de Salta y en la región NOA Argentina, se encuentra mayormente concentrada en la producción de tabaco Virginia (*flue cured*); la cual se caracteriza por requerir una etapa de curado de las hojas cosechadas como fase previa a su venta a las industrias. Este proceso, que forma parte de la etapa de “Producción primaria” según datos del Ministerio de Hacienda de la República Argentina (Ministerio de Hacienda, 2019), se lleva a cabo en estufas, donde el modelo de mayor difusión y penetración en el sector corresponde a las llamadas estufas “*bulk-curing*” (Rodríguez Faraldo y Zilocchi, 2012). El curado del tabaco constituye una etapa crítica en su producción, ya que determina la calidad y las características organolépticas finales del producto. Desde un punto de vista energético, se caracteriza por presentar un consumo energético intensivo tanto térmico como eléctrico. La crisis energética, con el correspondiente encarecimiento de energéticos que se viene produciendo en los últimos años, pone de manifiesto la importancia de destinar recursos y esfuerzos en optimizar procesos, de los que el sector agroindustrial no es ajeno.

En lo que se refiere específicamente al curado de tabaco, el mismo se encuentra dividido en una serie de etapas, claramente diferenciadas de acuerdo con los valores de humedad relativa y temperatura en el interior de las estufas (Condorí et al., 2020). Actualmente en la provincia de Salta la mayoría de las estufas de tabaco poseen gas natural como fuente térmica, con un consumo promedio de 1m³ por kg de tabaco curado. Se estima que existen en la región NOA del orden de 15000 estufas *bulk-curing*. Durante la época de producción, las estufas poseen ciclos de funcionamiento (curado) que ronda los 7 a 10 días, durante los cuales se mantienen encendidas de forma continua, la capacidad promedio de cada estufa es de 10 Tn de tabaco fresco por ciclo. Tanto el quemador, como el motor de las turbinas se apagan únicamente durante las fases de descarga y recarga. Se pone de manifiesto entonces la necesidad de dirigir esfuerzos hacia la mejora en la eficiencia energética de estos dispositivos, que repercutan fuertemente tanto en la estructura de costos de los productores tabacaleros como en la mejora de la

calidad final de sus productos (Cao, et al 2017). Desde el año 2009 el GEEDSP (Grupo de Eficiencia Energética y Desarrollo Socio Productivo) viene trabajando en el análisis energético asociado a la etapa de curado de la industria tabacalera, y con ello, en la propuesta de alternativas de mayor eficiencia energética, con uso combinado de energía solar (Altobelli et al. 2011, Altobelli et al., 2013). Sin embargo, la globalidad en la producción tabacalera ha generado el surgimiento de esfuerzos similares en otros países tales como China, Italia y Colombia (Zhao et al. 2019, Jun et al., 2012, Bao y Wang 2016, Cerquera Peña et al. 2010). De estos trabajos surge la hipótesis de apuntar a una mejora en el consumo de gas, a partir de aprovechar el calor residual de los humos del quemador y proponer el uso de los techos de las estufas para un sistema de colección solar térmica.

El presente trabajo corresponde a los resultados obtenidos a partir de la intervención de una estufa de curado de tabaco de tipo bulk-curing ubicada en las dependencias de un productor tabacalero de la localidad de Vaqueros, provincia de Salta. Este trabajo se enmarca en un convenio de asistencia realizado entre el Fondo Especial del Tabaco (Secretaría de Agricultura de la Nación) y el Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO).

MATERIALES Y METODOLOGÍA

La Estufa convencional intervenida

La estufa de tabaco intervenida se encuentra ubicada en la localidad de Vaqueros, provincia de Salta, en dependencias de un establecimiento tabacalero. El modelo corresponde al diseño *bulk-curing*, posee 4,67 m de ancho y 7,7 m de largo, con una altura máxima en la cumbre de 3,88 m, ver Figura 1. La estructura basal es de mampostería de ladrillo con revestimiento de cemento, siendo el resto de la construcción de paredes y techo de doble chapa galvanizada ondulada con aislación térmica de lana de vidrio entre ambas. En la parte posterior cuenta con el módulo o unidad de calor, conformado por el quemador de gas natural, con un intercambiador de calor de tipo banco de tubos, de veinte tubos, en disposición 4 x 5 filas, que posibilita el ingreso de aire caliente a la cámara de secado, sin permitir el ingreso de gases de combustión. La salida del humo de combustión se hace directamente por la parte superior de la unidad de calor al ambiente. El flujo de aire es forzado mediante una turbina centrífuga y motor de 4 kW que se ubica en el sector inferior de la unidad de calor, por debajo del quemador.



Figura 1: Vista oeste de la estufa de tabaco, con su unidad de calor, antes de ser intervenida.

Esta estufa es más alta de lo habitual, posee 4 niveles para la carga de los peines con hojas de tabaco, a diferencia de otras más grandes de 12 m de largo que sólo cuentan con 3 niveles, ver Figura 2. De esta manera logra el mismo volumen de carga con un largo de 7,7 m. El suelo de la cámara de secado tiene contra piso de cemento. Cabe mencionar que la mayoría de las estufas de la zona no poseen ni intercambiador de banco de tubos ni piso de concreto, estas son mejoras que introdujo el propietario del establecimiento con el tiempo.



Figura 2: Vista del frente de carga y descarga de la estufa, se observan la estructura de rack para los cuatro niveles de peines.

Mejoras introducidas a la estufa

Las mejoras estructurales propuestas a la estufa intervenida fueron tres:

1) Se colocan en el techo de la estufa dos precalentadores solares de aire, contruidos con caño estructural, cubierta de policarbonato alveolar de 6 mm de espesor, conformando un ducto que se conecta a la unidad de calor mediante una envolvente de chapa a nivel del techo para introducir solo aire precalentado a la unidad. El aire ambiente se precalienta a) recuperando el calor del humo de combustión desde la chimenea, para lo cual se extienden las chimeneas por caños redondos en el interior de los calentadores solares para tener contacto indirecto con el aire, y b) por ganancia directa de radiación solar absorbida por los dos calentadores, durante el día.

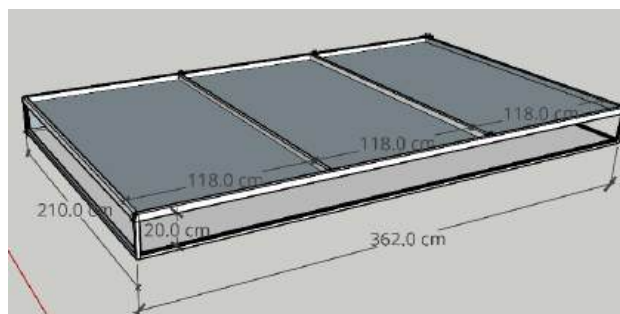


Figura 3: Detalle con medidas de uno de los módulos precalentadores de aire. La porción superior corresponde al colector solar y la inferior al vano que permite el flujo de aire hacia la cámara y que incluye los caños de salida de humo del quemador.

2) Se coloca una envolvente de chapa aislada térmicamente con lana de vidrio de 10 mm de espesor, en la parte superior de la unidad de calor para tomar aire precalentado desde el colector-techo de la estufa; esta modificación permite disminuir las pérdidas térmicas por chimenea y recuperar el calor que se pierde por la estructura de la unidad de calor original. A esta última ingresa el aire precalentado por la ventana habitual, que antes tomaba aire ambiente, lo que reduce el consumo del quemador de gas.

3) Se recupera el calor de las cañerías de salida de humo del quemador colocando una caja de distribución que tiene como entrada los dos caños rectangulares de 0,10 m x 0,2 m que vienen del intercambiador de calor, y como salida cuatro caños redondos de $7,5 \times 10^{-2}$ m de diámetro. Estos caños se colocan por el interior del colector solar recorriéndolo a lo largo y descargando el humo de combustión al ambiente, a la altura de la puerta de carga de la estufa, ver figuras 4 y 5.

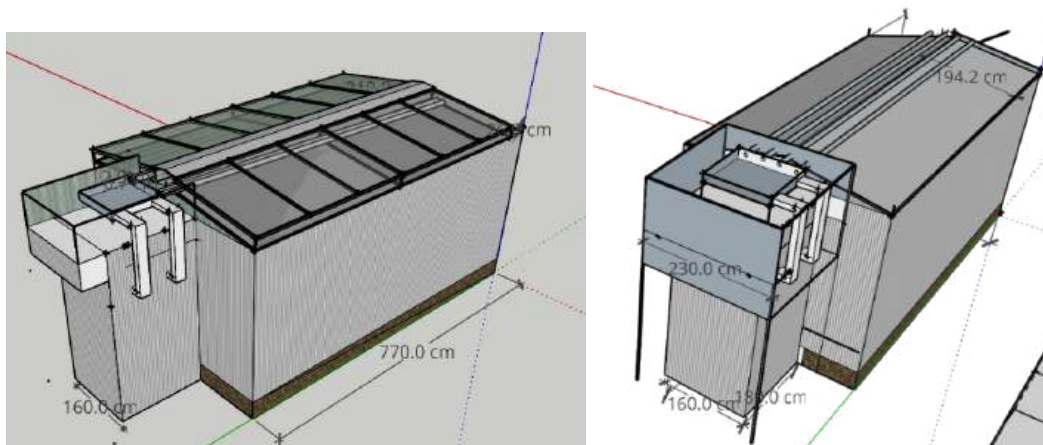


Figura 4: Esquema con medidas de la envolvente a la unidad de calor. Salida de humo del quemador de gas y caja de distribución con salida por caños redondos.

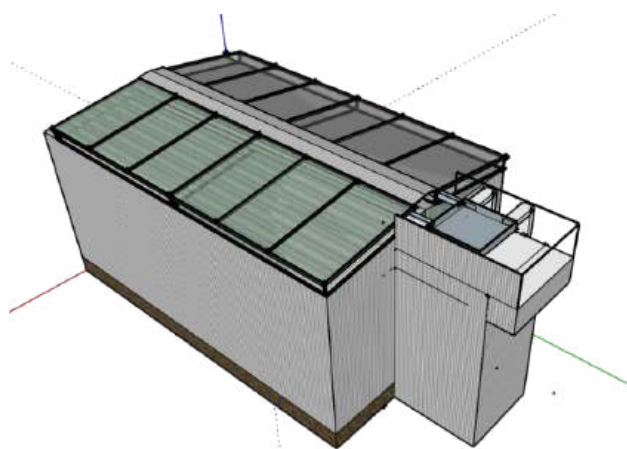


Figura 5: Detalle esquemático del acondicionamiento térmico propuesto.

Con estas modificaciones se recupera calor de la estufa las 24 horas de funcionamiento, y se aporta ganancia durante el día con energía térmica de la radiación solar. El aire que ingresa a la unidad de calor, para terminar de ser calentado por el quemador de gas, se encuentra a mayor temperatura que el ambiente produciendo ahorro de energía de acuerdo a la etapa de curado. El diseño final se basa en la hipótesis de contar con una construcción para facilitar la reconversión a futuro del parque de estufado de la provincia.



Figura 6: Fotografía aérea del sistema propuesto ya instalado en los techos de la estufa. Calentadores solares y envolvente a la unidad de calor.



Figura 7: Vista en planta del sistema de precalentamiento de aire instalado.

Sistema de medición en vacío de la estufa

Durante los meses de abril-mayo se trabajó en la puesta a punto y calibración del sistema de medición y las mediciones en campo se realizaron durante junio de 2023, se instalaron una serie de sensores térmicos y de flujo de aire, y se procedió a realizar las pruebas con el motor y quemador de la estufa encendidos. El sistema de medición estuvo compuesto por termocuplas tipo K (cobre-Constantán), y anemómetro de punta de hilo caliente. Los datos de temperatura se midieron y registraron en un micro *datalogger*. Los datos de irradiación global fueron solicitados para las fechas de las mediciones al Grupo de Estudio y Evaluación de la Radiación Solar del INENCO. Para este último caso, los datos corresponden a Irradiación Global sobre plano horizontal y fueron registrados en el predio de la Universidad Nacional de Salta, que se encuentra a pocos kilómetros del emprendimiento.

En la Figura 8 se muestra un esquema de la ubicación de las distintas mediciones de temperatura de acuerdo con la siguiente nomenclatura:

- Temp ambiente (T_{amb})
- Temperatura salida del colector solar (T_{cs})
- Temperatura medio colector solar (T_{cm})
- Temperatura ingreso aire caliente a la cámara (T_{ca})
- Temperatura chimeneas quemador (T_{ch})
- Temperatura salida humo (T_{sh})
- Flujo de aire ingreso colectores (\dot{m})
- Temperatura arriba intercambiador (T_{aint})

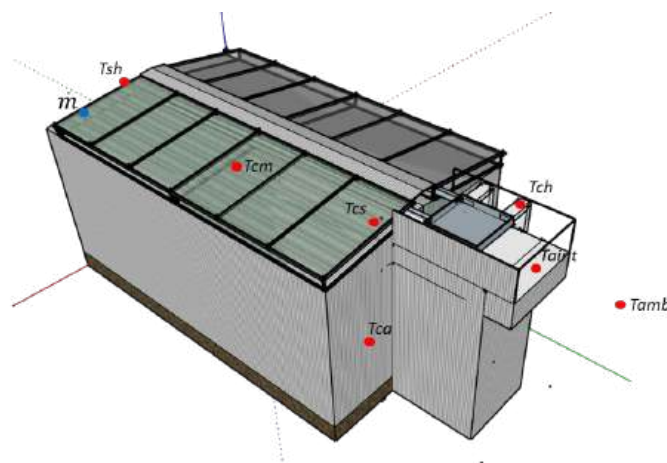


Figura 8: Esquema ubicación sensores de temperatura y velocidad de viento.

Los sensores de medición de temperatura fueron conectados a un Campbell CR23x, el cuál fue programado para efectuar el registro y el guardado promediado de datos cada minuto.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los ensayos fueron efectuados con la estufa sin carga en dos días consecutivos, buscando emular las rampas térmicas características del curado de tabaco Virginia.

Primer ensayo

Durante el primer día de medición simplemente se efectuó una rampa de temperatura, subiendo el termostato de la estufa hasta 70 °C, y se mantuvo en esa temperatura por un par de horas. Los datos registrados muestran un comportamiento de los valores de temperatura, correspondientes a los ciclos de encendido y apagado del quemador de la estufa.

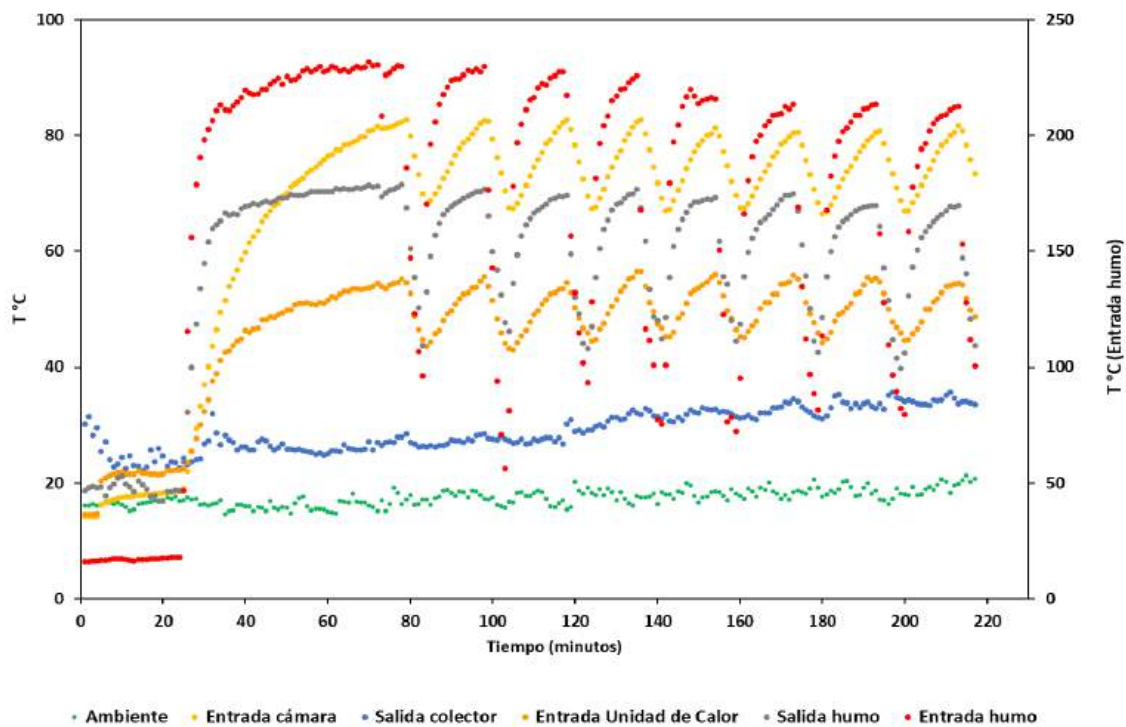


Figura 9: Temperaturas registradas durante el primer ensayo en vacío.

La temperatura de salida de humo del quemador se encuentra por encima de los 250 °C, la que se muestra en la gráfica corresponde a la entrada de la caja de distribución que ya perdió temperatura y es de aproximadamente 220 °C. La temperatura de salida del humo de los calentadores solares se encuentra siempre por debajo de los 70 °C, produciendo un salto térmico de 150 °C como mínimo, donde el calor es mayormente recuperado por el calentador solar. El aire que ingresa a la unidad de calor se encuentra alrededor de los 50 °C y es calentado en la unidad hasta los 70 °C, es decir se requiere un salto térmico de 20 °C en lugar de los casi 50 °C que requeriría si se toma aire ambiente como lo hacen las estufas convencionales. Se observa que la temperatura en los colectores no es afectada por el encendido y apagado del quemador de gas, lo que mostraría que el mayor aporte es solar durante las horas de ensayo, cercanas al mediodía solar.

Analizando la temperatura ambiente, y del colector, se destaca el salto de temperatura de entre 10 y 15°C. Esto se debe tanto a la colección solar como a la recuperación del calor residual provenientes de las chimeneas del quemador. Este último aspecto se puede ver en el gráfico de la Figura 10.

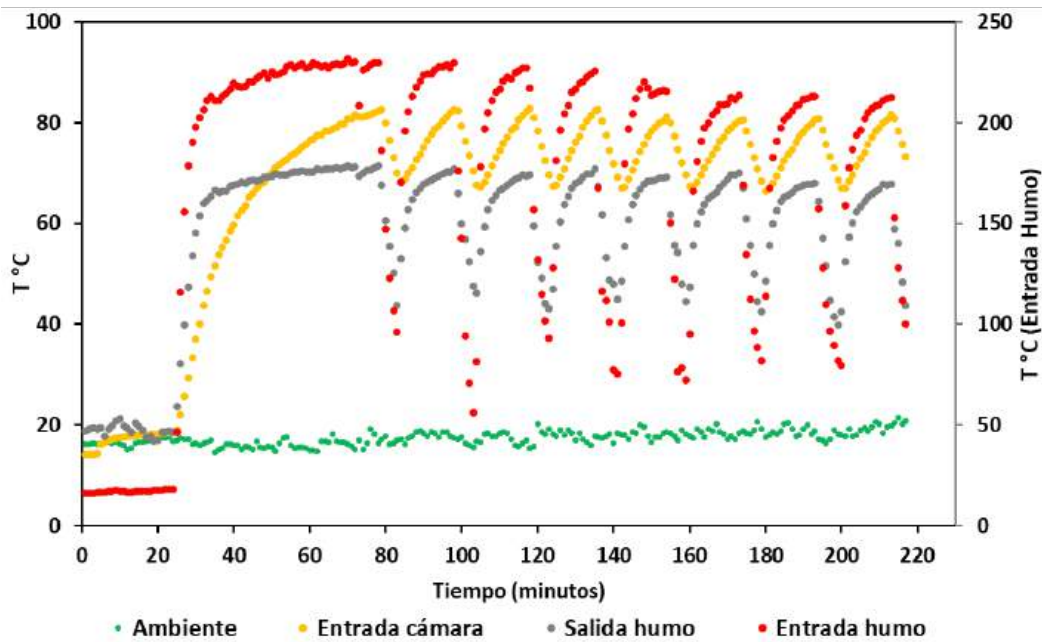


Figura 10: Temperatura de entrada de humo a la envolvente (marrón) y salida de humo del calentador solar (verde).

La diferencia de temperatura entre la entrada de humo (correspondiente a la entrada al sistema de precalentamiento de aire en la envolvente), y de salida de humo, es debida a la recuperación del calor que ingresa con el aire precalentado a la unidad de calor. Como resultado, y sumado a los efectos del quemador, se puede ver en color amarillo la curva correspondiente a la temperatura con que ingresa el aire a la cámara de la estufa. Dado que la temperatura de salida de los calentadores solares es de aproximadamente 35 °C, al final de figura 10, la envolvente como recuperador de calor aportan los aproximadamente 15 °C restante para llevar el aire precalentado a los 50 °C.

Segundo ensayo

Durante el segundo ensayo, se buscó emular las rampas del proceso de curado de tabaco, con regulación manual y empleo del termostato de la estufa, aumentando la temperatura cada 10 grados, seguido de una meseta de estabilización, hasta llegar a los 70 °C. Los registros repiten el comportamiento de la temperatura durante el ensayo anterior, ver Figura 11.

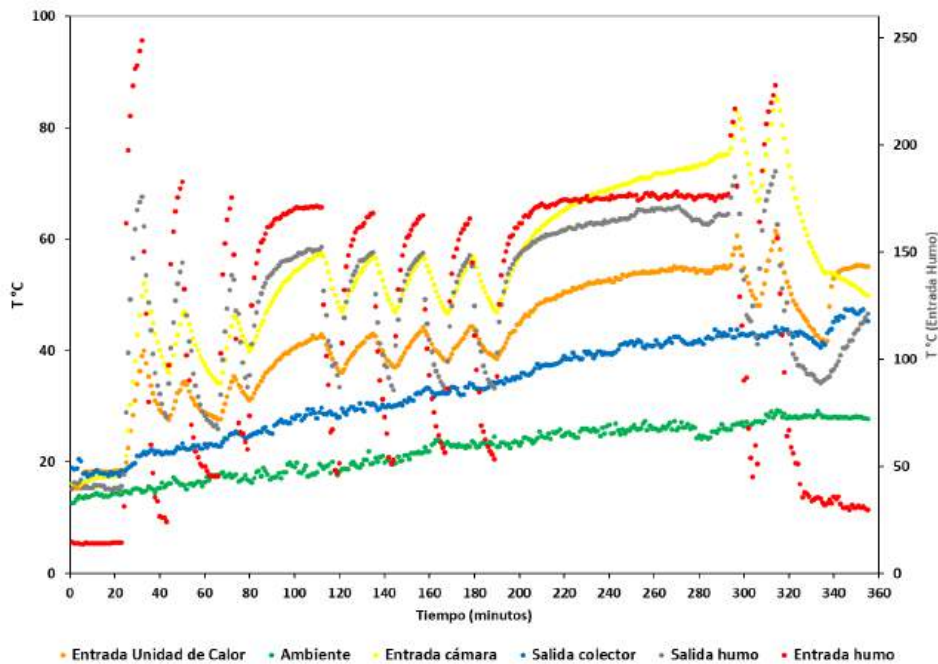


Figura 11: Temperaturas registradas durante el segundo ensayo.

Dado que se llegaron a alcanzar y mantener temperaturas correspondientes a la última etapa de curado, la diferencia entre las temperaturas de salida de los colectores y la ambiente son más grandes. Es decir, la primera parte, alrededor del minuto 70 de la curva, corresponde a temperaturas de la etapa de amarillamiento y las últimas, alrededor del minuto 250, a las de secado de tallos y nervaduras. El acercamiento de la temperatura de entrada a la unidad de calor y la salida de humos muestra que el sistema es más eficiente con las pérdidas térmicas más altas, ver Figura 12.

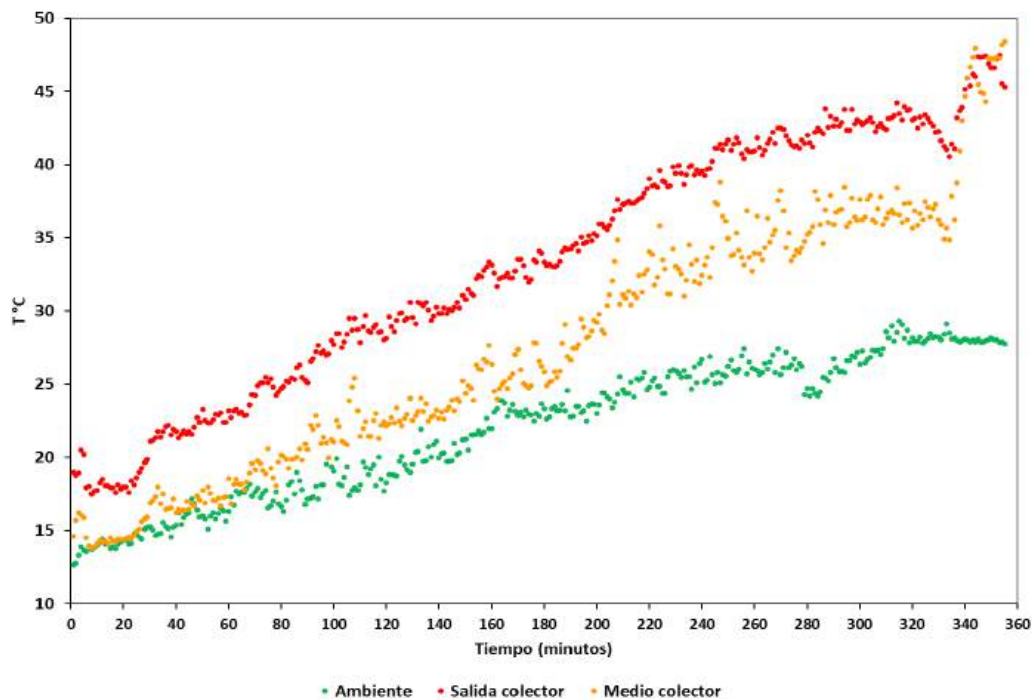


Figura 12: Temperaturas del colector y del aire ambiente durante el segundo ensayo.

En la Figura 13, cuando la estufa está a 70 °C, se observa que el sistema de precalentamiento entrega aire a 50 °C mientras la temperatura ambiente es aproximadamente 20 °C. Los resultados obtenidos en pruebas con la estufa vacía permiten estimar un ahorro energético directamente proporcional a la reducción del salto térmico, 50 °C que se necesitaría con el sistema sin mejora, a los 20 °C que se necesitan con el sistema mejorado. Es decir, el ahorro producido será aproximadamente del 40% bajo estas condiciones para esta etapa de curado.

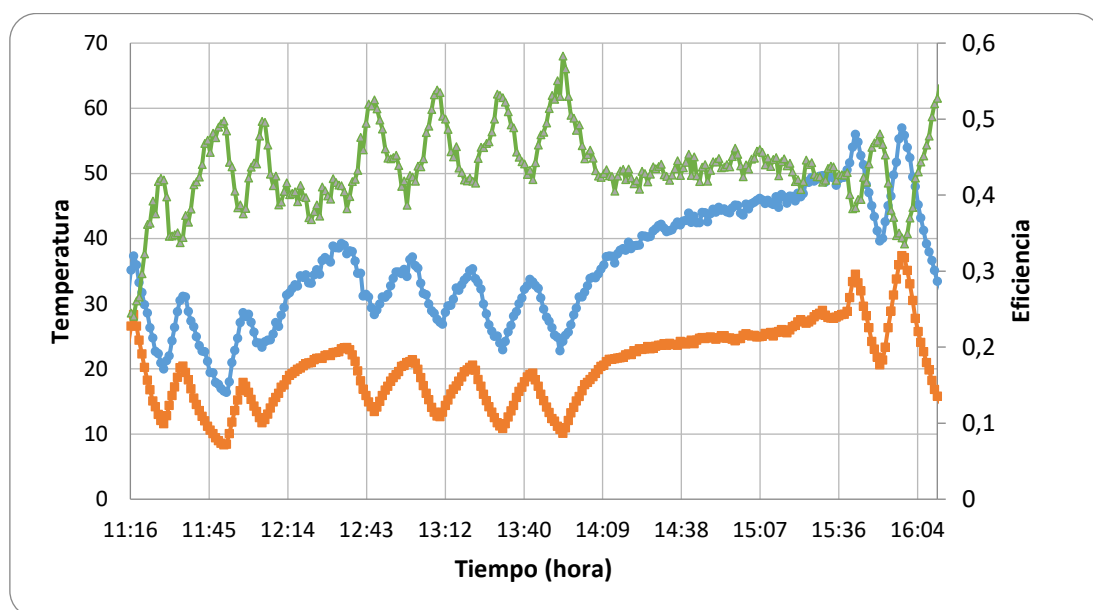


Figura 13: Eficiencia del sistema a lo largo del ensayo.

Análisis financiero

La inversión inicial del sistema propuesto incluye los gastos asociados a la compra de materiales y equipos de medición, así como a la retribución de la mano de obra encargada de la construcción y montaje. Dado el contexto económico de inflación y devaluación sostenida en la que se encuentra el país, la totalidad de cálculos fueron realizados en pesos y en dólares estadounidenses considerando una cotización equivalente a \$249/USD (Cotización Divisas Para la Venta, Fuente Banco Nación, 31/05/2023).

Tabla 1: Datos de inversión requerida para el sistema de precalentamiento propuesto.

<i>Inversión</i>	<i>USD</i>
<i>Materiales</i>	2222,22
<i>Mano de obra</i>	1777,78

Consumo de gas

La estufa se encuentra abastecida por gas natural, para la estimación de los costos se tuvo en cuenta el régimen tarifario actual de la empresa GASNOR, a cargo de la distribución de este servicio (Res 102/2023). Dados los niveles de consumo del establecimiento del productor, se considera que el mismo pertenece a la categoría P3.

Tabla 2: Datos de producción de tabaco y consumo de gas del emprendimiento.

Consumo energético gas estufada	850	m ³
Días de proceso	11	
Estufadas por campaña	11	
Nivel de producción (Tabaco curado) por campaña	9272,73	kg
Nivel de producción (Tabaco curado) por campaña	9,273	Tn
Consumo energético de gas por campaña	9272,73	m ³

Tabla 3: Datos tarifarios para categoría de consumo P3.

Categoría	P3
<i>Cargo fijo mensual</i>	\$3877,34
<i>Tarifa por m³</i>	\$34,84

Tabla 4: Datos de gastos por consumo de gas.

Gastos por consumo energético gas	
Gasto por campaña	\$323093,79
Costo fijo por campaña	\$46528,11
Costo anual en gas	\$369621,90
Costo anual en gas (USD)	USD 1484,43

Con el fin de referir los cálculos a valores comparables, se empleó la tarifa internacional de gas natural proveniente de la *U.S. Energy Information Administration* (www.iea.gov). Para el caso específico del gas natural se consideró la tarifa de consumidor final categoría comercial (USD/mil pies cúbicos), aplicado al promedio de los valores mensuales del último año (mayo 2022 a mayo 2023): USD 12,39/mil pies cúbicos.

- Costo anual en gas a precio internacional: USD 4093,51

Ahorro estimado

Con las mejoras incorporadas a la estufa, se prevé un ahorro en el consumo de gas del orden del 40%. Esto dado por el precalentamiento del aire que ingresa a la misma, debido a la recuperación del calor del humo de las tuberías del quemador y al aprovechamiento térmico de la radiación solar.

Tabla 5: Ahorros financieros estimados con la intervención propuesta.

<i>Ahorros en el consumo energético gas</i>	
<i>Ahorro por estufada</i>	\$11846,77
<i>Ahorro por campaña</i>	\$129237,52
<i>Ahorro por campaña (USD)</i>	USD 519,03
<i>Ahorro por campaña a precio internacional (USD)</i>	USD 1637,4

Tiempo de recupero de la inversión

El Tiempo de Recupero de la Inversión (TRI) es un indicador financiero utilizado para evaluar la rentabilidad de una inversión. El mismo se refiere al período de tiempo necesario para que los flujos de efectivo generados por una inversión iguallen o superen el monto inicial de inversión realizado. En otras palabras, es el tiempo que se tarda en recuperar el dinero invertido a través de los ingresos generados por la inversión.

$$TRI = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujos anuales}}$$

Considerando para el caso bajo estudio al ahorro como los beneficios generados por las mejoras de la estufa, y considerando el monto de la inversión requerida para lograr los mismos, surge que:

$$TRI = \frac{USD\ 4000}{USD\ 519,03} = 7,7\ \text{campañas}$$

Con precio internacional del gas

$$TRI = \frac{USD\ 4000}{USD\ 1637,4} = 2,44\ \text{campañas}$$

Para los cálculos previos no se incorporó un ajuste por inflación ni por recategorización de consumidores en las tarifas de gas natural. Se entiende que, los tiempos de recupero de la inversión serían menores incluyendo en su cálculo los cambios en el cuadro tarifario argentino.

CONCLUSIONES

Como resultado del Convenio objeto del presente, se realizó el acondicionamiento térmico a una de las estufas de curado de tabaco de tipo *Bulk-Curing*, ubicada en la localidad de Vaqueros, Salta. Dicho acondicionamiento consistió en la incorporación en techos de un sistema de precalentamiento del aire que ingresa a la cámara de la estufa. Este sistema se encuentra compuesto por dos colectores solares de aire, que permiten aprovechar la radiación solar con fines térmicos. Asimismo, se incorporó también en la estructura una extensión de las chimeneas de salida de humo del quemador de la estufa. De esta manera se posibilita el aprovechamiento del calor residual del quemador, que reingresa a la estufa con el aire precalentado.

El sistema propuesto permite mejorar la eficiencia energética de la estufa “*bulk curing*” disminuyendo el consumo de gas natural, y reduciendo el tiempo de curado, respecto de las estufas convencionales. En la etapa de mayor temperatura del proceso de curado, 70 °C, el sistema de precalentamiento entrega aire a 50 °C de temperatura mientras la temperatura ambiente es de 20 °C. Es decir, el salto de temperatura correspondiente al ahorro es de 30 °C para esta etapa y disminuye para las etapas iniciales. Si bien estos datos se encuentran basados en pruebas en vacío, cabe esperar que, a pesar del agregado de masa térmica a partir de la carga con hojas, los porcentajes de ahorro se mantengan. Esta conclusión se soporta también en la experiencia previa del equipo de trabajo con estufas de tabaco, específicamente con evaluación energéticas de las mismas.

Los resultados obtenidos en pruebas con la estufa vacía permiten suponer un ahorro energético que es proporcional a la reducción del salto térmico de 50 °C que se necesitaría con el sistema sin mejora a los 20-25 °C que se necesitan con el sistema mejorado.

Con respecto al análisis financiero, teniendo en cuenta el contexto actual de inflación y devaluación de la moneda nacional, los cálculos se trataron de estandarizar en referencia al dólar estadounidense de los costos y precios actuales del gas natural. El indicador financiero obtenido fue el del tiempo de recupero de la inversión (TRI), el que arroja un valor de alrededor de 8 campañas con el precio actual del gas; sin embargo, se debe considerar que no se incluye en el cálculo los cambios en el precio del gas, tanto por la inflación como por la actualización, quita de subsidios a la energía y nueva categorización de usuarios. Se trató entonces de eliminar estas posibles distorsiones de los cálculos, y se emplearon las tarifas internacionales de gas natural para usuarios finales de categoría comercial. En este último caso el indicador baja a 2,5 campañas; entendiéndose que los costos de incorporar el sistema de precalentamiento propuesto se recuperarían con el ahorro logrado en dos campañas y media.

Quedan por efectuarse ensayos durante la campaña del año 2023-2024, con carga de tabaco fresco; lo que permitiría tanto confirmar los resultados logrados sobre el comportamiento térmico del sistema, como definir con mayor claridad los ahorros estimados. Por otro lado, se efectuará también la instalación de un variador de frecuencia para el motor que controla la turbina forzadora de aire, lo que se espera redunde también en mejoras del consumo eléctrico.

REFERENCIAS

- Altobelli F., Condorí M., Durán G., Díaz Russo G. (2011). Determinación de pérdidas térmicas estructurales en estufas de tabaco tipo bulk-curing en la provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 07.47-07.53.
- Altobelli F., Vicente P., Díaz Russo G., Condorí M. (2013). Evaluación de sistemas de ahorro energético en estufas de curado de tabaco tipo bulk curing. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 17, pp.07.37-07.44.
- Bao Y., Wang Y. (2016) Thermal and Moisture Analysis for Tobacco Leaf Flue-curing with Heat Pump Technology. *Procedia Engineering*, 146, 481-493.
- Cao G., Bao Y., Wu, Ch., Wang, Y. (2017). Analysis on efficiency optimization of tobacco leaf flue-curing process. *Procedia Engineering*, 205, 540–547. 10.1016/j.proeng.2017.10.413.
- Condorí M., Albesa F, Altobelli F., Duran G., Sorrentino C. (2020). Image processing for monitoring of the cured tobacco process in a bulk-curing stove. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105-113. 10.1016/j.compag.2019.105113.
- Cerquera Peña N., Ruiz Osorio Y., Pastrana Bonilla E. (2010) Evaluación del horno de curado de tabaco por convección forzada USCO-MADR. *Ingeniería e Investigación*, 30, 91-96.
- Jun L., Juan W., Zhentao Z., Luwei Y., Zhaomin L., Qingmin Y. (2012) Experimental study on performance of heat pump system for tobacco leaf flue-curing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(25): 63-67
- MINISTERIO DE HACIENDA, Presidencia de la Nación (2019). *Informes de Cadenas de Valor. Tabaco*, mayo 2019. ISSN 2525.0221.
- Rodríguez Faraldo M. A. y Zilocchi H. O. (2012). *Historia del cultivo de tabaco en Salta*. Salta Capital: Ministerio de agricultura ganadería y pesca.
- Zhao J., Wang R., Wang M., Huang X. (2019). Application of Heat Pump Energy-Saving Flue-Cured Tobacco Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 252, Issue 3.

INCORPORATION OF AN AIR PREHEATING SYSTEM IN A TOBACCO BARN

ABSTRACT: In the NOA region of Argentina, specifically in the province of Salta, tobacco farming is focused on the production of Virginia tobacco, which is characterized by requiring a curing stage of the leaves in barns. The results obtained from the intervention of a bulk-curing tobacco barn located in Vaqueros, Salta, are presented. An air preheating system, consisting of solar collectors and recovery of residual heat from the burner smoke, was installed on the roofs of the barn. The results of the preliminary tests show that an estimated saving of about 40% can be achieved when comparing the air outlet temperature values of the proposed system with those required by the curing process and the environment. The financial evaluation of the investment values is carried out together with the

consumption savings, indicating a payback period of less than three harvest seasons, taking into account international gas prices.

Keywords: tobacco, energy efficiency, solar energy

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ESTABLECIMIENTOS DE SALUD PARA LA INCORPORACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Joaquina Cristeche¹, Emilia Urteneche¹, Dante Babero¹, Irene Martini¹, Silvana Flores Larsen²

¹Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de La Plata (FAU – UNLP)
Calle 47 N° 162, La Plata, CP 1900, Buenos Aires
Tel: +54-221-423-6587/90 int. 250

²Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Salta, Argentina.

E-mail: joquinacristeche@iipac.laplata-conicet.gov.ar

RESUMEN: En Argentina, más del 50% de la energía se genera a partir de fuentes de origen fósil y el 34% del consumo de energía final corresponde a los sectores residencial y comercial-público. Dentro de este último, se encuentran los establecimientos del sector salud, los cuales presentan el mayor consumo de energía por unidad de superficie. Con el fin de reducir las emisiones provocadas por el consumo energético y la correspondiente huella de carbono, este trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología para determinar el potencial de los establecimientos de salud para la incorporación de energía solar. Para ello, se clasifica a los establecimientos en función de su potencial solar para luego, asociarles datos referidos al consumo energético. Una vez comprendida la relación entre el consumo energético y el potencial solar es posible sugerir medidas, para cada grupo, orientadas a la incorporación de energía solar, tanto en las parcelas de los establecimientos como en la envolvente de los edificios. Dado que las medidas a sugerir son específicas para cada grupo de hospitales, la metodología desarrollada se aplica a la red de salud conformada por todos los establecimientos de una región en particular, en este caso, la Micro-Región Gran La Plata.

Palabras clave: diagnóstico energético, hospitales, transición energética, huella de carbono, energías renovables.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad innegable, motivo por el cual cada vez son más los países que están trabajando en el desarrollo de políticas y estrategias que ayudan a combatir de manera conjunta esta situación. Una de las causas directamente relacionadas con este contexto es el aumento exponencial del consumo de energía a nivel mundial (Naciones Unidas, 2015). Es por ello que la eficiencia energética y la sustitución de fuentes convencionales por renovables forman parte de las principales preocupaciones de todos los países, donde coinciden múltiples factores tanto económicos, como así también políticos y sociales. Sin embargo, cada día se consume más energía dependiendo en gran medida de las fuentes no renovables (Svampa y Viale, 2021).

La edificación construida representa más de un tercio del consumo de energía final a nivel mundial y casi el 40% del total de las emisiones directas e indirectas de CO₂ (UNEP 2020) En Argentina, aproximadamente el 59% de la energía se genera a partir de fuentes de origen fósil y el 34 % del consumo de energía final corresponde a los sectores residencial y comercial-público (Secretaría de Energía 2021). Así, los edificios que conforman tales sectores constituyen un escenario propicio para conseguir importantes ahorros en términos de energía (y en sus correspondientes emisiones). Los edificios destinados a la salud pertenecen al sector comercial-público y son los que presentan el mayor consumo

de energía por unidad de superficie, por lo cual se los suele clasificar como energo-intensivos. A diferencia de los edificios residenciales y otros edificios comerciales, los hospitales funcionan 24 horas al día, 7 días a la semana, atendiendo a miles de empleados, pacientes y visitantes. Además, las normas de ventilación, aire acondicionado, iluminación, confort térmico, etc., aumentan considerablemente los patrones de consumo energético (Papantoniou, 2012).

Es probable que esta tendencia se mantenga e inclusive aumente debido a múltiples factores que impulsan el uso de energía en dicho sector. Entre ellas se pueden mencionar: (i) que el número de persona mayores de 60 años se triplique hasta alcanzar los dos millones de personas en el año 2050; (ii) que cada vez se requiera más equipos para mejorar la calidad de los diagnósticos y la prestación asistencial y (iii) que existe la necesidad de ampliar los equipos informáticos y electrónicos. Sumado al crecimiento del uso de la energía, se espera que sus costos aumenten un 25% en los próximos 5 años siendo de esta manera el efecto financiero extremadamente grande. A esto se suma que, la pandemia por COVID-19 iniciada en el año 2020, y sus consecuencias colaterales inmediatas relacionadas con la reducción forzada del consumo energético en algunos sectores y aumento en otros, ha subrayado la importancia de rever el comportamiento energético en general y principalmente en los sectores energo-intensivos y protagónicos en pandemia, como es el caso del sector salud.

A partir de los relevamientos técnico-constructivos, se observa que el parque edilicio del sector salud en Argentina es, en general, poco eficiente con respecto al consumo energético, advirtiendo desequilibrios entre la necesidad de mantener niveles de habitabilidad razonables, alta operatividad y elevados presupuestos para afrontar las demandas requeridas. El abordaje de los aspectos referidos a la eficiencia energética en los edificios energo-intensivos del sector salud resulta fundamental para comprender su funcionamiento y poder sugerir pautas que permitan lograr ahorros de energía y sustitución de fuentes convencionales por renovables con sus consecuentes efectos asociados.

La incorporación de energías renovables que reemplacen a fuentes tradicionales (de origen fósil) no permiten reducir el consumo energético (pues se trata de sustituir una fuente de energía por otra) pero sí las emisiones y la huella de carbono asociadas al consumo de energía en cada establecimiento.

En este trabajo se desarrollará una metodología orientada a analizar el potencial solar de los establecimientos de salud a los efectos de encontrar grupos de similares características. Los métodos de agrupamiento forman parte de los modelos descriptivos (Hernández Orallo et al. 2004) e intentan construir grupos homogéneos en cuanto a que la distancia entre los elementos de un mismo grupo es menor a la distancia con elementos de otro grupo. Normalmente, los métodos de agrupamiento utilizan la distancia euclídea para calcular la similitud o proximidad entre pares de elementos. Es decir, a mayor proximidad, mayor similitud, y menor distancia entre pares de elementos. Yañez (1986) estableció en su trabajo una clasificación de los hospitales de acuerdo a su partido arquitectónico.

En la misma línea, Czajkowski (1993) clasificó los edificios hospitalarios teniendo en cuenta el análisis tipológico y su evolución. En el trabajo de Urteneche et al. 2023, se utilizó un método de agrupamiento (K-means o K-medias) para identificar edificios de salud “homogéneos” en lo que refiere a las características técnico-constructivas de la envolvente edilicia. La posibilidad de encontrar establecimientos de similares características, en ocasiones, suele permitir sugerir medidas uniformes para todos los elementos que forman parte de un grupo (hospitales en este caso) y de allí la importancia de esta labor inicial.

Para el desarrollo del trabajo, se aplicará la metodología a los establecimientos hospitalarios de la red de salud pública de la Micro-Región Gran La Plata (MRGLP) que cuentan con servicio de internación. Cabe aclarar que se considera que un establecimiento de salud incluye tanto al edificio construido donde se proporciona la atención médica como la parcela de terreno donde se encuentra ubicado. Es decir, no sólo se analizarán características de la edilicia construida sino también el área no construida dentro de la parcela de cada uno de los hospitales. Se construirán indicadores referidos a características arquitectónicas con el fin de poder realizar un agrupamiento (clustering) basado en los mismos. A los grupos detectados se les asocian los consumos energéticos anuales de gas y de electricidad, con el objetivo de obtener un diagnóstico a partir del cual sea posible definir estrategias para cada grupo de hospitales que permitan dimensionar el tipo de energía a sustituir, como por ejemplo el número, tamaño

y configuración de paneles.

DESARROLLO METODOLÓGICO DE PROPUESTAS PARA LA INCORPORACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

La metodología desarrollada para fundamentar propuestas que incorporen energía solar en las parcelas de los hospitales de la red, comprende los siguientes pasos o etapas:

1. Análisis de la red de salud.
2. Definición de indicadores arquitectónicos de los Nodos o establecimientos de salud y relevamiento de sus valores para el diagnóstico del potencial solar.
3. Diagnóstico del consumo energético (de electricidad y gas) de cada establecimiento hospitalario (nodo) de la red.
4. Clasificación de los establecimientos de salud en función de su potencial solar para encontrar grupos de similares características, a partir de la utilización de un algoritmo de agrupamiento.
5. Análisis de la relación que existe entre el potencial solar de cada grupo.
6. Cálculo estimado de energía solar posible de incorporar en muros, techo y superficie no construida, a los establecimientos hospitalarios pertenecientes la red de salud.

A continuación, se describen en mayor detalle cada etapa y se presentan los resultados obtenidos en cada una de ellas.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

1. Análisis de la red de salud

La primera etapa consiste en el análisis de la red de salud de la Micro-Región Gran La Plata (MRGLP), conformada por los partidos de La Plata, Berisso y Ensenada, en 2 niveles jerárquicos:

- i. Red: es el nivel de más alta jerarquía y comprende a todos los establecimientos (nodos) donde se encuentran los hospitales en la MRGLP. Ver Figura 1.
- ii. Nodo o establecimiento de salud: corresponde a la superficie construida y no construida de un hospital.

2. Definición de indicadores arquitectónicos de los Nodos o establecimientos de salud y relevamiento de sus valores para el diagnóstico del potencial solar

El diagnóstico del potencial solar de cada establecimiento consistió en evaluar la energía que se puede producir por superficie potencial disponible. La misma se entiende como el área disponible del establecimiento ya sea el edificio construido (muro y techo) y/o la superficie no construida para la instalación de Energías Renovables (ER) teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Superficie potencial en muro:

- Sólo se consideran las fachadas con orientación al Norte y Noroeste.
- Se diferenciará entre superficie vidriada y superficie opaca, sólo considerando la opaca como potencial.
- No se considera la superficie en donde se encuentren puertas de acceso/salida de personas y/o vehículos.
- No se considera la superficie sombreada por el mismo edificio o por el entorno.
- No se consideran las fachadas de construcciones patrimoniales o históricas.

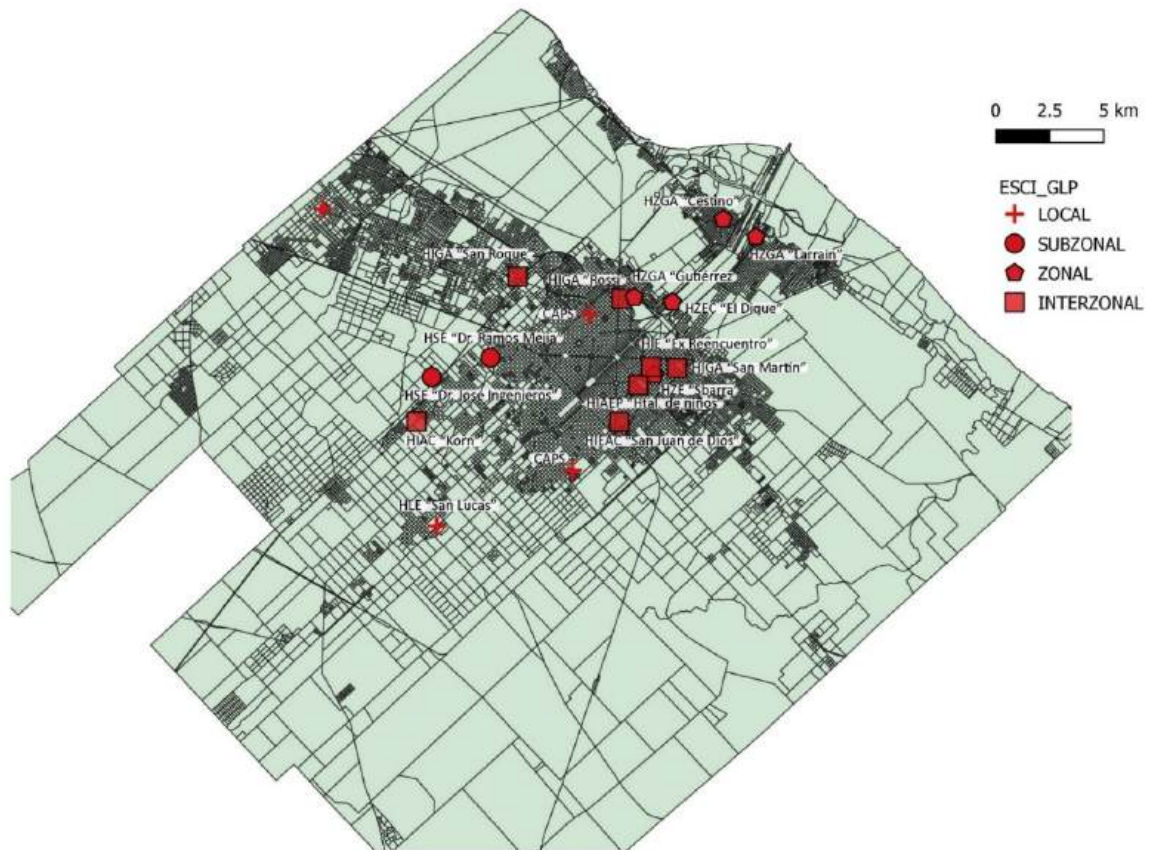


Figura 1. Mapa de los edificios del sector salud en la MRGLP.

Por lo que se puede definir a la superficie potencial en muro como en la Ec. (1):

$$\text{Superficie potencial muro} = \sum_{i=1}^n (SM_i - SV_i - SP_i - SMS_i) \quad (1)$$

donde:

- SM: superficie muro
- SV: superficie vidriada
- SP: superficie de puertas y accesos
- SMS: superficie de muro sombreada
- i: cada una de las superficies al Norte y al Noroeste
- n: totalidad de muros al Norte y al Noroeste

Superficie potencial en techo:

- Se consideran los techos con una inclinación menor o igual a la latitud geográfica y con orientación Norte y Noroeste.
- No se consideran techos curvos (cóncavos).
- No se consideran techos con baja o nula accesibilidad ya que es necesario poder acceder para realizar mantenimiento y limpieza.
- No se consideran techos sombreados por el mismo edificio u otro del mismo hospital.

Por lo que se puede definir a la superficie potencial en techo como la Ec. (2):

$$\text{Superficie potencial techo} = \sum_{i=1}^m (ST_i - STC_i - STPA_i - STS_i) \quad (2)$$

donde:

- ST: Superficie techo
- STC: Superficie de techo curvos
- STPA: Superficie de techo con poca/nula accesibilidad
- STS: Superficie de techo sombreada

i: cada una de de las superficies al Norte y al Noroeste
 m: totalidad de techos

Superficie potencial no construida:

- Se considera superficie de estacionamiento no techado.
- Se consideran parques.
- Se consideran los caminos de acceso y/o unión entre diferentes pabellones.
- No se consideran superficies sombreadas por el mismo establecimiento, por el entorno y/o por el arbolado.

Por lo que se puede definir a la superficie potencial en superficie no construida como la Ec. (3):

$$\text{Superficiepotencialnoconstruida} = \sum(\text{SNC} - \text{SNCS}) \quad (3)$$

donde:

SNC: Superficie no construida

SNCS: Superficie no construida sombreada

Una vez definidas las restricciones y consideraciones de la superficie potencial, se definen los indicadores arquitectónicos representativos de cada establecimiento. Los mismos serán adimensionales ya que se calcularán como la relación entre la superficie potencial con respecto a la superficie total, donde esta última no tiene en cuenta las restricciones y se define de la siguiente manera:

- *Superficie total muro:* la totalidad de superficie de muro opaca orientada al Norte y Noroeste.
- *Superficie total techo:* la sumatoria de la superficie de techos.
- *Superficie total no construida:* la totalidad de la superficie parcelaria sin construir.

Por lo que los indicadores se definen como la Ec. (4):

$$\text{INDICADORARQUITECTÓNICO}_k = \frac{\text{SuperficiePotencial}_k}{\text{SuperficieTotal}_k} \quad (4)$$

Donde k es muro, techo y superficie no construida.

Para el cálculo de superficies, se utilizaron los planos de los establecimientos y el Street View de Google, quedando entonces definido para cada establecimiento tres indicadores arquitectónicos (muro, techo y superficie no construida), los cuales permiten aproximar el potencial solar por establecimiento por tipo de superficie.

El resultado se puede observar en la Tabla 1. Los mismos serán analizados en el siguiente paso.

Tabla 1. Resultados de indicadores arquitectónicos de la red de salud en estudio.

ESTABLECIMIENTOS	MURO - (M) %	TECHO - (T) %	SUPERFICIE NO CONSTRUIDA- (SNC) %
HZGA "Dr. Ricardo Gutiérrez"	25,8	28,1	16,5
HIEAC "San Juan de Dios"	51,9	48,0	27,8
HIGA "San Roque"	43,3	70,0	23,5
HIAEP "Sor María Ludovica"	8,6	29,0	0,0
HIAC "Dr. Alejandro Korn"	13,1	20,2	75,6
HZGA "Horacio Cestino"	80,1	99,7	84,0
HZE "Dr. Noel H. Sbarra"	55,6	100,0	88,2
HZGA "Dr. Larrain"	39,9	92,7	100,0
HIGA "Dr. Prof. Rodolfo Rossi"	44,7	84,1	100,0
HIGA "Gral. San Martín"	71,9	63,5	50,3

3. Diagnóstico del consumo energético (de electricidad y gas) de cada establecimiento hospitalario (nodo) de la red.

El diagnóstico del consumo energético consistió en conocer los consumos de gas y electricidad en kWh/año para cada establecimiento. Además, se presenta la superficie total de la parcela del establecimiento, la cual dimensiona el tamaño del terreno. Esta información, es fundamental para el análisis previo de cuánta energía de origen fósil puede sustituirse por energía solar. Se muestran a continuación en la Tabla 2, los valores obtenidos en cada establecimiento.

Tabla 2. Valores del consumo de gas y electricidad de cada establecimiento.

ESTABLECIMIENTOS	Superficie del establecimiento (m ²)	Consumo Gas Natural (MWh/año)	Consumo de electricidad (MWh/año)
HZGA "Dr. Ricardo Gutiérrez"	16576	484,69	709,42
HIEAC "San Juan de Dios"	875023	1031,58	1117,26
HIGA "San Roque"	25264	1177,48	1573,00
HIAEP "Sor María Ludovica"	18148	4035,97	2974,51
HIAC "Dr. Alejandro Korn"	1316842	1667,05	8363,16
HZGA "Horacio Cestino"	4128	409,00	432,72
HZE "Dr. Noel H. Sbarra"	7401	283,44	208,34
HZGA "Dr. Larrain"	5562	500,50	702,44
HIGA "Dr. Prof. Rodolfo Rossi"	6766	1161,44	1792,61
HIGA "Gral. San Martín"	102902	4346,03	5734,18

4. Clasificación de los establecimientos de salud en función de su potencial solar para encontrar grupos de similares características, a partir de la utilización de un algoritmo de agrupamiento.

En esta etapa se utilizó el algoritmo de agrupamiento (clustering) K-means para agrupar los hospitales en grupos de 2 hasta 9 elementos. Para cada hospital de cada grupo encontrado se calculó la distancia a su correspondiente centroide. Así, el hospital más cercano a su centroide sería "el más representativo" del grupo. Asimismo, para cada grupo se calculó la distancia promedio a su centroide. Esta información permite la construcción del diagrama de Elbow el cual muestra la distancia promedio al centroide en función del número de grupos. A partir del diagrama de Elbow se pudo determinar que el número K de grupos que debía tomarse para analizar los hospitales fue de 2 debido a que en la función para k=3 obtiene un valor superior que para k=2. Esto significa que si se agrega una clase más (la tercera) la distancia promedio al centroide aumenta y consecuentemente no se justifica su incorporación. Ver Figura 2.

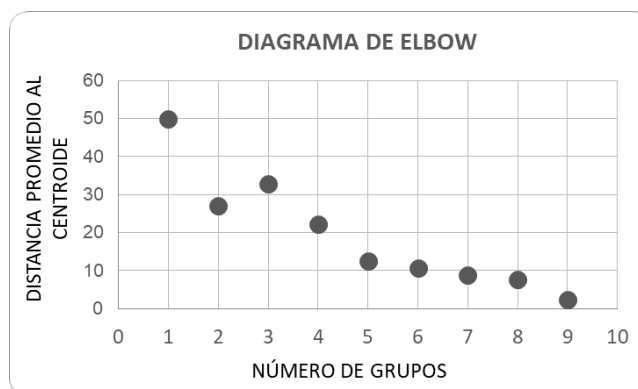


Figura 2. Diagrama de Elbow.

Los métodos de agrupamiento han sido aplicados en otros trabajos que analizan el consumo de energía en hospitales. Por ejemplo, en el trabajo de Urteneche (et al. 2022) se utilizó el algoritmo K-means para identificar hospitales con tipos de envolvente edilicia similares. Asimismo, en el trabajo de Chévez (et al. 2017) se utilizó el mismo algoritmo para encontrar, en el sector residencial, hogares con consumo de energía similares. Por lo tanto, en el presente trabajo, los 2 grupos de hospitales

encontrados son los que se sintetizan en la Tabla 3.

Tabla 3. Agrupamiento de los establecimientos según el clustering.

GRUPO 1	GRUPO 2
HZGA "Dr. Ricardo Gutiérrez"	HZGA "Horacio Cestino"
HIEAC "San Juan de Dios"	HZE "Dr. Noel H. Sbarra"
HIGA "San Roque"	HZGA "Dr. Larrain"
HIAEP "Sor María Ludovica"	HIGA "Dr. Prof. Rodolfo Rossi"
HIAC "Dr. Alejandro Korn"	HIGA "Gral. San Martín"

5. Análisis de la relación que existe entre el potencial solar de cada grupo.

En esta etapa se analizan los grupos según su potencial solar, aplicando herramientas estadísticas y la información que brinda el clustering, con el fin de relevar el conjunto de indicadores por grupo. Inicialmente, se calcularon una serie de indicadores estadísticos cuyos valores se presentan a continuación en Tabla 4.

Tabla 4. Estadística descriptiva aplicada a las variables de cada grupo.

Herramientas estadísticas	GRUPO 1			GRUPO 2		
	M (%)	T (%)	PNC (%)	M (%)	T (%)	PNC (%)
Mínimo	8,6	20,2	0,0	39,9	63,5	50,3
Máximo	51,9	70,0	75,6	80,1	100,0	100,0
Promedio	28,5	39,1	28,7	58,5	88,0	84,5
Mediana	25,8	29,0	23,5	55,6	92,7	88,2
Desvío estándar	16,8	18,0	25,3	15,4	13,6	18,2

A los efectos de facilitar el análisis de los datos para cada indicador, el diagrama de caja y bigotes en la Figura 3, muestra cada una de las cajas que representan el rango intercuartílico de cada indicador. La línea que se observa dentro de cada caja representa la mediana, mientras que la "x" se refiere a la media y los bigotes que se extienden del valor máximo al mínimo. Dicho gráfico proporciona información sobre la dispersión, centralidad y la presencia de valores atípicos en los datos. En síntesis, la Figura 3 muestra con claridad que los establecimientos del grupo 2 tienen mayor potencial con respecto a la posibilidad de incorporar energías renovables solares tanto en la fachada como en el techo, así como en la superficie no construida del establecimiento.

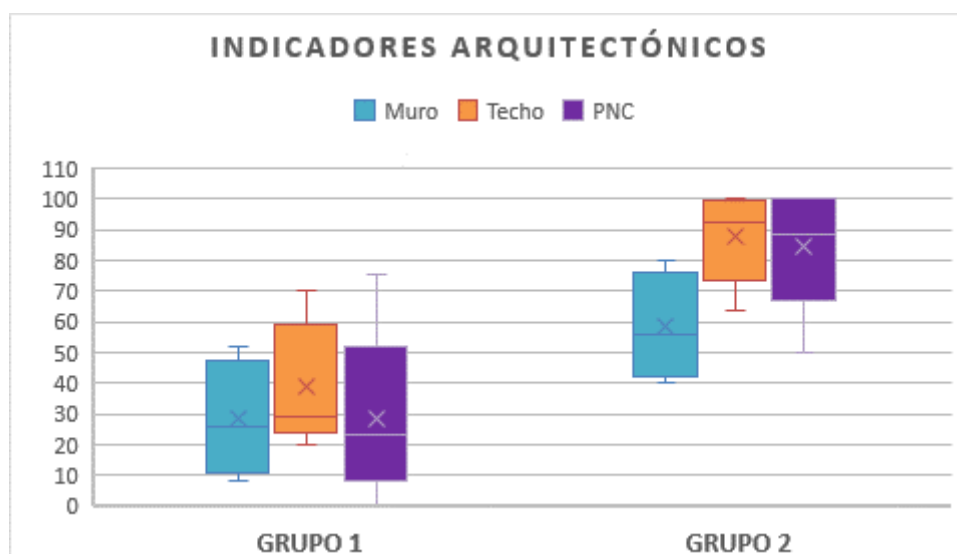


Figura 3. Diagrama de caja y bigotes por indicador y por grupo.

Luego, se utilizó la información del clustering, que como se adelantó en la etapa 4, el centroide representa las coordenadas promedio de un grupo determinado. Por lo tanto, el elemento que se encuentra más cerca del centroide es el que posee las características más similares a la mayoría de los elementos del grupo. Bajo este concepto se identifica el hospital más representativo en cada grupo, siendo el HZGA “Dr. Ricardo Gutiérrez” el del grupo 1, mientras que el HZE “Dr. Noel H. Sbarra” es el del grupo 2. (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Distancia a centroide por hospital en $k=2$.

GRUPO	ESTABLECIMIENTOS	Distancia a Centroides (k=2)
GRUPO 1	HZGA "Dr. Ricardo Gutiérrez"	12,2
	HIEAC "San Juan de Dios"	28,1
	HIGA "San Roque"	35,7
	HIAEP "Sor María Ludovica"	29,7
	HIAC "Dr. Alejandro Korn"	37,5
GRUPO 2	HZGA "Horacio Cestino"	24,6
	HZE "Dr. Noel H. Sbarra"	12,9
	HZGA "Dr. Larrain"	24,6
	HIGA "Dr. Prof. Rodolfo Rossi"	21,1
	HIGA "Gral. San Martín"	44,2

Del análisis estadístico en conjunto con la información brindada por el clustering, se eligen los valores de los indicadores característicos por grupo (Ver Tabla 6). En este caso, se consideran los valores de indicadores que representan a cada grupo, igual a los valores del establecimiento más representativo, considerando además que los mismos son muy similares a la mediana de cada grupo.

Tabla 6. Indicadores por grupo.

GRUPO	M (%)	T (%)	PNC (%)
GRUPO 1	25.8	28.1	16.5
GRUPO 2	55.6	100.0	88.2

6. Cálculo estimado de energía solar posible de incorporar a los establecimientos de salud.

En esta etapa se obtiene una primera aproximación de la energía solar que podría incorporarse en cada establecimiento según el grupo que integre. Se utilizan como los indicadores específicos de cada grupo los que se presentan en la Tabla 6 y considerando la Ec. (4), se calcula la energía que puede producirse en techo, muro y superficie no construida. El cálculo se realiza en los establecimientos más representativos de cada grupo. Para obtener la energía anual, se evaluó la irradiación solar en el plano inclinado de cada mes del año y la cantidad de días. Luego se suman las energías mensuales, obteniendo la energía anual según las Ec. (5) y (6):

$$E_{P(annual)} = \sum_{i=1}^{12} E_{P(mensual)_i} \quad (5)$$

$$E_{p(mes)} = P_{P(STC)} \cdot HPS_{(STC)} \cdot PR \cdot n_i = [kWh/mes] \quad (6)$$

donde:

$P_{P(STC)}$: potencia pico de la suma de todos los paneles por superficie (kWp).

$HPS_{(STC)}$: horas pico solar media por mes (h/día), que se obtienen de la NASA.

PR: rendimiento energético de la instalación.

n_i : cantidad días del mes.

Para el caso del PR se calcula según la E. (7), considerando las pérdidas por temperatura de celda (por lo que depende del panel seleccionado), las pérdidas por efecto del polvo y suciedad, por dispersión, por reflectancia, por pérdidas en el cableado, por disponibilidad y rendimiento.

$$PR = (1 - A - P_{temp}) \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \quad (7)$$

En un primer paso, se identifica del punto 2 de la metodología, la superficie potencial de cada hospital representativo del grupo. Luego se selecciona un panel, el cual para el caso de estudio se selecciona el panel solar de marca Restarsolar con una potencia pico de 560W¹. La información que se requiere, además de la potencia pico, son el largo y el ancho, la temperatura normal de operación de la celda (NOCT) y los coeficientes de temperatura. Una vez identificada esta información se considera un factor de ocupación del terreno, es decir el área en el plano horizontal requerida por el predio, sobre el área neta de la suma de todos los módulos fotovoltaicos. En este caso, se toma un valor conservador de manera tal de asegurar que no se produzca sombreado entre paneles según lo calculado en la Ec. (8):

$$Superficie\ disponible\ para\ paneles = \frac{Superficie\ potencial}{1,8} \quad (8)$$

Una vez obtenida la superficie disponible para colocar paneles, se calcula la cantidad de paneles totales por superficie dependiendo del área total de cada panel. Con toda esta información y utilizando los siguientes valores para el azimut y la inclinación del panel (ver Tabla 7), se obtiene la disposición de paneles por superficie por hospital, la cual se puede observar en la Tabla 8. La energía generada por superficie por grupo se observa en la Tabla 9.

Tabla 7. Valores de Azimut e inclinación de paneles según superficie.

Superficie	Azimut (°)	Inclinación del panel (°)
Muro al Norte	0	90
Muro al Noroeste	30	90
Techo	0	30
Superficie no construida	0	30

Tabla 8. Resumen de cantidad de paneles por superficie.

	GRUPO 1			GRUPO 2		
	Superficie potencial (m2)	Superficie para paneles (m2)	Nro. de paneles	Superficie potencial (m2)	Superficie para paneles (m2)	Nro. de paneles
Muro al Norte	365.84	203.24	78	645.6	358.7	138
Muro al Noroeste	106.4	59.11	22	270.0	150.0	58
TECHO	852.9	473.8	183	1556.2	864.6	334
PNC	408.9	227.2	87	2011.0	1117.2	432

Tabla 9. Energía generada por superficie potencial por grupo.

	Energía Generada (MWh/año)	
	GRUPO 1	GRUPO 2
MURO	50	98
TECHO	143	261
PNC	68	337

Con esta información, relacionándola con la energía eléctrica consumida por los establecimientos representativos de cada grupo (Tabla 2) se puede aproximar el consumo eléctrico a sustituir por energías renovables (EERR), cuánto se puede inyectar a la red y además poder seleccionar qué superficie elegir para realizar la instalación. Algunas comparaciones se presentan en la Tabla 10.

La Tabla 10 muestra los valores obtenidos para los hospitales más representativos de cada grupo: el HZGA “Dr. Ricardo Gutiérrez” del grupo 1 y el HZE “Dr. Noel H. Sbarra” correspondiente al grupo

¹ La hoja de dato del panel se encuentra en [Panel Solar Restarsolar - 560W - Pallet De 31 Unidades - Enertik Argentina](#)

2. Se observa que el hospital del grupo 1 no puede sustituir de forma completa el consumo de electricidad, generada principalmente a partir de fuentes de origen fósil, por energía solar. En cambio, el hospital representativo del segundo grupo sí puede hacerlo y su excedente puede ser inyectado a la red.

Tabla 10. Resultados de porcentaje de EERR generada respecto a la energía eléctrica consumida.

	GRUPO 1	GRUPO 2
Energía eléctrica consumida (MWh/año)	709.42	208.34
% de sustitución de energía eléctrica fósil por EERR (autoconsumo)	36.76	100.00
% de energía EERR que se puede inyectar a la red	0	487.74

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología orientada a fundamentar propuestas que incorporen energía solar en las áreas construidas y no construidas de los establecimientos hospitalarios pertenecientes a la red de salud de la Micro-Región Gran La Plata. La aplicación de la metodología brinda una rápida prefactibilidad técnica respecto a la posibilidad de incorporar energías renovables para sustituir las fósiles, ya que con la primera aproximación de cantidad de energía generada por superficie potencial se puede estimar la cantidad de energía que se puede sustituir en la red por grupo.

Resulta importante destacar que, si bien el objeto de estudio de este trabajo corresponde a los establecimientos de salud de la MRGLP, los aportes producidos podrían ser aplicados a otros casos de estudios con sus correspondientes ajustes y adaptaciones. De esta manera, la metodología desarrollada puede ser transferida, por ejemplo, a la red de educación o administración pública las cuales también pertenecen al sector comercial y público. En síntesis, el abordaje de los aspectos referidos a la eficiencia energética en los edificios energo-intensivos del sector salud resulta fundamental para comprender su funcionamiento y poder sugerir pautas que permitan sustituir fuentes convencionales por renovables con sus consecuentes efectos asociados. En este sentido, resulta prioritario realizar acciones tendientes a precisar y tratar de minimizar esta divergencia de la oferta-demanda con una visión de largo plazo que incluya mejoras sustantivas en el futuro energético de los países y de las ciudades. En consecuencia, la posible sustitución de fuentes fósiles por renovables ha tomado un papel importante en la agenda de muchos países, incluyendo a la Argentina.

Resulta fundamental entonces, contar con una metodología útil y práctica que permita evaluar el potencial de los establecimientos de salud con el objeto de proponer pautas específicas por grupo de establecimientos para la incorporación de energía solar. Tal como se ha podido observar a partir de los datos de la Tabla 10, los hospitales más representativos del caso de estudio han podido, en el peor caso, sustituir más de un tercio de la energía eléctrica producida a partir de fuentes convencionales por renovables y en el mejor caso cubrir el 100% del consumo e inyectar el excedente a la red. Esto implica, consecuentemente, una reducción significativa de la huella de carbono asociada al consumo de energía eléctrica de los establecimientos hospitalarios.

REFERENCIAS

- Chávez, P. J. Barbero, D. A. Martini, I. Discoli, C. A. (2017). Application of the k-means clustering method for the detection and analysis of homogeneous residential electricity consumption sectors at La Plata city. *Sustainable cities and society*.
- Czajkowski, J. D. (1993). Evolución de los edificios hospitalarios. Aproximación a una visión tipológica. *Actas del IV Congreso Latinoamericano y 7° Jornadas Interdisciplinarias de la Asociación Argentina de Arquitectura e Ingeniería Hospitalaria*. Buenos Aires.
- Hernández Orallo, J. Ramírez Quintana, M. J. y Ferri Ramírez, C. (2004). *Introducción a la minería de datos*. Pearson-Prentice Hall.
- Naciones Unidas. (2015). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Conferencia de Las Naciones Unidas Sobre El Medio Ambiente y El Desarrollo*. <https://doi.org/10.54114/revanlisis.v17i1.17556>

- Papantoniou, D. K. (2012). Energy conservation techniques for hospital buildings. *Advances in Building Energy Research*.
- Secretaría de Energía. (2021). Balance Energético Nacional 2021. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>
- Svampa, M. Viale, E. (2021). *El colapso ecológico ya llegó: Una brújula para salir del (mal) desarrollo*. Buenos Aires: Siglo Veintiuno.
- Urteche, E. Barbero, D. A. Fondoso Ossola, S. T. Martini, I. (2023). Clasificación de establecimientos de salud a partir de características técnico-constructivas de la envolvente edilicia para fundamentar medidas de eficiencia energética. *Energías renovables y medio ambiente*. Vol 50. (en prensa).
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *2020 Global status report for buildings and construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. UNEP.
- Urteche, E. Barbero, D. A. Fondoso Ossola, S. T. Martini, I. (2022). Clasificación de establecimientos de salud a partir de características técnico-constructivas de la envolvente edilicia para fundamentar medidas de eficiencia energética. *ERMA*. (en prensa)
- Yañez, E. (1986). *Hospitales de seguridad social*. Limusa.
- Grossi Gallegos, H., & Righini, R. (2007). *Atlas de Energía Solar de La República Argentina*.
- Wallace, C. L. (2017). *Tesis de Maestría en Energías Renovables: Cálculo y elaboración de los discos de irradiación solar para su uso como herramienta de gestión en políticas provinciales para la promoción de la energía solar en la república argentina*. UTN – Regional Buenos Aires.

EVALUATION OF THE POTENTIAL OF HEALTH ESTABLISHMENTS FOR THE INCORPORATION OF SOLAR ENERGY

ABSTRACT: In Argentina, over 50% of the energy is generated from fossil sources, and 34% of the final energy consumption corresponds to the residential and commercial-public sectors. Within the latter, health sector establishments are included, which exhibit the highest energy consumption per unit of area. With the aim of reducing emissions caused by energy consumption, and the corresponding carbon footprint, this study seeks to develop a methodology to assess the potential for integrating solar energy in healthcare facilities. To achieve this, the establishments are categorized based on their solar potential, followed by associating energy consumption data with each category. Once the relationship between energy consumption and solar potential is understood, recommendations can be made for incorporating solar energy, both within the premises of the establishments and in the building envelope. Given that the measures to be suggested are specific for each group of hospitals, the developed methodology is applied to the health network made up of all the establishments of a particular region, in this case, the Greater La Plata Micro-Region.

Keywords: energy diagnosis, hospitals, energy transition, carbon footprint, renewable energy.

INSTRUMENTOS PARA COMBATIR A LA POBREZA ENERGÉTICA EN LOS PAÍSES DE AMÉRICA LATINA: LOS CASOS DE ARGENTINA, BRASIL Y CHILE

Mauro Alejandro Montone¹, Rodrigo Javier Durán¹, Miguel Ángel Condori¹

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) — Universidad Nacional de Salta (UNSa) — Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Tel. 03874516592

E-mail: mauromontone@hotmail.com

RESUMEN: La pobreza energética ha recibido en los últimos años una atención creciente en el ámbito de la política pública a nivel global. Diferentes países han desarrollado estrategias para abordarla, estimarla y definir instrumentos políticos que apunten a combatirla. El caso de los países de América Latina, el estudio y conocimiento sobre la pobreza energética es incipiente, sin embargo, pueden identificarse medidas de incidencia en alguna de sus dimensiones. El presente trabajo examinó los programas nacionales de incidencia en la pobreza energética para los casos de Argentina, Brasil y Chile, mediante una metodología de evaluación basada en la teoría. Se utilizaron fuentes secundarias relativas a los portales de gobierno, leyes, documentos oficiales y una revisión bibliográfica sobre las políticas seleccionadas. Se identificaron 18 programas para los tres países de los cuales más de la mitad se enmarcan en política de incidencia en la dimensión de acceso y asequibilidad de los servicios de energía. Se llega a la conclusión de que tanto las políticas de eficiencia energética para hogares vulnerables, como los mecanismos de provisión de información y sensibilización son dos de las áreas donde los países estudiados deberían profundizar de cara al futuro, puesto que ofrecen soluciones más sustentables, menos costosas y que operan simultáneamente en el corto y largo plazo.

Palabras clave: pobreza energética, instrumentos políticos, América Latina.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la pobreza energética (en adelante, PE) ha recibido en los últimos años una atención creciente por parte de diversos investigadores, gobiernos, organismos internacionales y organizaciones sociales a nivel global (González-Eguino, 2015). Si bien este concepto hace alusión a una configuración específica de las diferentes formas en que se materializan las privaciones y la desigualdad, es relevante en sí mismo, debido al rol central que tiene la energía para el desarrollo sostenible, así como también para mitigar la pobreza en general (Pelz et al., 2018). Desde la publicación de su primera definición operativa, que establece un umbral del 10% de la relación gastos energéticos-ingresos totales del hogar (Boardman, 1991), hasta la actualidad, el concepto ha sido ampliamente discutido, interpretado y adecuado a diferentes contextos. Más allá de sus divergencias, la PE puede definirse, en términos generales, como una situación en la que un hogar no puede hacer frente a los requerimientos energéticos necesarios para llevar una vida digna (Okushima, 2017).

Existe un amplio consenso en torno a la concepción de la PE como un fenómeno culturalmente sensible y multidimensional, que varía según la temporalidad y espacialidad en que se sitúa un grupo humano por lo que resulta difícil explicarla mediante un indicador único (Bouzarovski & Simcock, 2017; Croon et al., 2023; Simcock et al., 2021). En la práctica, existen múltiples indicadores que pueden englobarse principalmente en tres grupos (Thema & Vondung, 2020). Un primer grupo de indicadores basados en el gasto, considerando la relación entre ingresos y las cargas energéticas del hogar. Un segundo grupo llamado “enfoque consensual” basado en aspectos subjetivos asociadas a la insatisfacción de demandas consideradas como básicas para la sociedad en donde se encuentra el hogar. Un tercer grupo de

indicadores de valores absolutos o medición directa, en los cuales el nivel de servicios energéticos alcanzado en el hogar se compara con un nivel de consumo estándar previamente establecido. La atención en las distintas definiciones y estimaciones del fenómeno se vinculan con el interés de los Estados en poder establecer estrategias de acción que implementen políticas y medidas para erradicar, reducir o mitigar sus efectos sobre la población que sufre esta situación de privación.

Al igual que en su estudio, los principales avances en el reconocimiento oficial por parte de los gobiernos y en la definición de políticas para combatir a la PE se han desarrollado en los países europeos, con el liderazgo del Reino Unido (Bouzarovski, 2018). Generalmente, estas iniciativas se vinculan con los aspectos determinantes y causas del fenómeno. Percibir ingresos bajos, pagar altos costos por los servicios energéticos domésticos y habitar una vivienda energéticamente ineficiente, fueron las principales causas de la PE que se mencionan en la literatura especializada (Bouzarovski & Petrova, 2015). De ahí que se considere a las políticas y medidas de respuesta a la situación de PE como aquellas que, desde su formulación y aplicación, busquen actuar sobre algunos de estos aspectos determinantes, aun cuando se trate de Estados o regiones que no cuenten con un reconocimiento formal sobre la problemática (Bednar & Reames, 2020).

En la emergente agenda de investigación de la PE, los trabajos que abordan sobre las políticas públicas de incidencia en el fenómeno ocupan un lugar aún minoritario. Entre los principales antecedentes se encuentran estudios sobre las políticas promovidas desde la Unión Europea (Bouzarovski et al., 2012), así como también las medidas implementadas por los gobiernos de los países europeos (Kerr et al., 2019; Middlemiss, 2017; Sovacool, 2015), generalmente vinculados con medidas de transferencias de monetarias para costear la energía en estaciones frías, esquemas de protección a los consumidores según criterios de vulnerabilidad y políticas de eficiencia energética en la vivienda e integración de energías renovables (Pye et al., 2015).

Para el contexto de los países latinoamericanos, Griffa y Marcó (2019) aportaron una primera aproximación a los mecanismos utilizado por los distintos países, aunque se centró en las políticas de tarifa social. Asimismo, se presentan algunos trabajos sobre la pertinencia territorial del fenómeno de la PE y su relación con la oferta de políticas energéticas y sociales de incidencia, como en los casos de Argentina (Durán & Condori, 2021; Ibáñez Martín et al., 2020; Zabaloy et al., 2023), Brasil (Jannuzzi, 2010; Mazzone, 2021) y Chile (Alvial-Palavicino & Ureta, 2017; Amigo et al., 2018).

En el presente trabajo se propone recorrer, identificar y caracterizar a las políticas de incidencia en el fenómeno de la PE para los casos de Argentina, Brasil y Chile, a partir del enfoque propuesto por Pye et al. (2015). El trabajo tiene carácter exploratorio, en donde se busca adentrarse en un terreno hasta ahora poco explorado como lo es el fenómeno de la PE en los países latinoamericanos y su relación con las políticas públicas.

METODOLOGÍA Y PERSPECTIVA CONCEPTUAL

Enfoque de los instrumentos

Diversos autores (Lascoumes & Le Gales, 2007; Howlett, 2004; Weiss, 1997; Enzensberger et al., 2002) consideran a los instrumentos políticos como unidades de análisis útiles para el abordaje heurístico de las políticas públicas. Se define al enfoque de los instrumentos como la apreciación de las características del repertorio de herramientas disponibles que estructuran a la acción de gobierno para atender una determinada demanda de la población (Salamon, 2002). Para analizar a los instrumentos, este trabajo utiliza el método de evaluación cualitativa basada en la teoría propuesto por Murphy et al. (2012), el cual consiste en tres pasos. En primer lugar, se identifican y caracterizan los instrumentos en función de su propio contenido, tal como expresa el o los documentos que lo contienen. En segundo lugar, se infiere una teoría política subyacente. Se asume que cada instrumento tiene un modelo teórico sobre la forma en que se debería alcanzar el objetivo propuesto por quienes lo formularon que generalmente se encuentra implícito, por lo cual, el analista lo debe reconstruir (Harmelink et al., 2005). En tercer lugar, se describe la aplicación y las repercusiones de los instrumentos a partir de la recopilación de la información secundaria disponible.

Los instrumentos políticos dirigidos a combatir la PE pueden enmarcarse en diversos ámbitos de la política pública (Cludius et al., 2018). En este trabajo, el análisis se enfoca en los instrumentos dirigidos al sector residencial. También, se recorta el objeto limitándose a los programas nacionales vigentes. Se consideran los instrumentos que sean ejecutados por el respectivo Estado nacional/federal de cada caso. Respecto a la fuente de datos e información documental relativa al contenido y formulación de los instrumentos se han seleccionado aquellas presentes en los portales institucionales de Argentina, Brasil y Chile. Por otro lado, se han considerado informes publicados y los documentos normativos (leyes, marcos regulatorios, normas, resoluciones, etc.) relativos a cada programa. La selección de los instrumentos y documentos se fundamenta en su relación con los aspectos conceptuales de la PE, especialmente con los factores causales más reconocidos en la literatura. Bouzarovski y Petrova (2015) sintetizan 6 factores de vulnerabilidad de la PE: 1) accesibilidad al recurso limitada; 2) baja capacidad de pago; 3) baja flexibilidad (incapacidad de recurrir a otros servicios, empresas prestadoras, equipamientos y fuentes energéticas); 4) baja eficiencia energética del hogar; 5) desequilibrios en los requerimientos energéticos del hogar y los servicios/equipamientos con los que se dispone y; prácticas ineficientes de consumo y uso de energía doméstica.

Por otro lado, para la recolección de información relativa a la aplicación e impacto (esperado) de los instrumentos, se recurrirá a documentos de trabajo e informes publicados por los gobiernos y sus organismos (si lo hubiere), artículos científicos, información estadística, etc.

Marco analítico de las políticas

Un esquema de categorías ampliamente utilizado para analizar las políticas y medidas de mitigación de la PE es la propuesta de Pye et al. (2017) que las clasifica en 1) apoyo financiero directo —erogaciones directas a los hogares para pagar las tarifas y centradas principalmente en un alivio en el corto plazo—; 2) protección adicional a los consumidores —esquemas de protección directa o indirecta al consumo minorista de energía a usuarios con algún grado de vulnerabilidad—; 3) programas de eficiencia energética dirigidos al sector residencial —tiene la intención de que los hogares vulnerables destinen menos recursos para obtener prestaciones que atiendan sus necesidades—; 4) información y sensibilización —apuntan a mejorar la comprensión de los derechos de los consumidores y la información sobre las tarifas del mercado y las medidas de ahorro energético.

Se añade una categoría más, considerando la realidad social y material de los países latinoamericanos, en donde se considera la dimensión de la calidad en el acceso a la energía (Urquiza et al., 2019) por lo que se añade una categoría relativa a los instrumentos que atienden esta demanda. Las categorías quedan definidas como se observan en la Fig. 1.



Figura 1: Tipología de políticas y medidas de incidencia en la PE. Adaptación de la Pye et al. (2017) en base a Urquiza et al. (2019).

Para cada instrumento analizado se considera, además, la forma en la que se establece el grupo destinatario que recibe el beneficio y los mecanismos de asignación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron y examinaron 17 programas nacionales vinculados con el fenómeno de la PE para los casos de Argentina (N=6), Brasil (N=4) y Chile (N=8). Todos los programas responden a políticas sectoriales, siendo 15 programas enmarcados en el área de la política energética y 2 enmarcados dentro del ámbito de las políticas habitacionales, con un impacto (esperado) indirecto sobre aspectos relativos a las privaciones energéticas domésticas. Se examinan a continuación.

Apoyo financiero directo

En esta categoría se incluyen tres programas pertenecientes cada uno a los países seleccionados. Como se observa en la Tabla 1, en los casos de Argentina y Brasil el monto se estima en relación con el costo de la garrafa de gas licuado y se aplica para los habitantes de bajos ingresos de todo el país mediante inscripción previa, sin variaciones estacionarias. En el caso de Chile, el beneficio es un monto fijo y se circunscribe a una región específica, asignándose de forma automática a un porcentaje de hogares vulnerables previamente identificados en un registro social de hogares.

Tabla 1: instrumentos de apoyo financiero directo. Elaboración propia en base a la información de los portales de gobierno de Argentina, Brasil y Chile

Nombre (país)	Descripción	Grupo destinatario
Programa Hogar (Ar)	Subsidio directo y mensual equivalente al 80% del valor efectivo de la garrafa de gas licuado de 10 kg. Surge en el año 2015.	Hogares de bajos ingresos que no posean conexión a gas por red. Asignación mediante inscripción.
Auxílio Gás (Br)	Transferencia directa equivalente al 50% de la garrafa GL de 13kg otorgada cada dos meses. Surge en el año 2001.	Hogares de muy bajos ingresos (inferior a medio salario mínimo). Asignación mediante inscripción.
Subsidio a la Calefacción (Ch)	Transferencia de una suma fija de 100.000 pesos chilenos para costear gastos de calefacción durante los meses de invierno. Surge en el año 2016.	80% de los hogares más vulnerables de la Región de Aysén. Asignación automática según registro social de hogares.

Estos tipos de medidas son las que se dirigen a las causas más superficiales y contingentes de la PE. Ofrecen la ventaja de que pueden establecer modelos de focalización precisos, que reducen al mínimo los errores de inclusión, esto es, que hogares que no se encuentran dentro del grupo destinatario del programa por no cumplir las condiciones establecidas reciban el beneficio.

Protección adicional a los consumidores

Las medidas que se enmarcan en esta categoría, al igual que las medidas de financiamiento directo, tienen incidencia directa en la PE y se concentran en aspectos vinculadas con la dimensión de gasto excesivo como una solución de corto plazo (Pye et al., 2017). Este el caso de los esquemas de subsidios indirectos a la oferta, generalmente con algún mecanismo de focalización aplicable a cierto universo de consumidores vulnerables, así como también los esquemas de suspensión de las desconexiones o moratorias por falta de pago. Los subsidios a las tarifas de servicios energéticos han sido aplicadas por la gran mayoría de los países de América Latina y el Caribe (Canese, 2013). Como se observa en la Tabla 2, los tres países seleccionados presentan mecanismos de subsidios a las tarifas.

Argentina es el país que posee más programas enmarcados en esta categoría. Siguiendo a Zabaloy et al. (2023), se produce un solapamiento entre los programas de la tarifa social, el régimen de zonas frías y los subsidios a la tarifa general que contribuyen a que no podría asegurarse que los mecanismos de focalización atiendan a los principios de equidad distributiva. En ese sentido, se han publicado resultados sobre la implementación de la tarifa social de los servicios de electricidad y gas durante el período 2016-2018, presentándola como una política focal de exclusión (Durán & Condori, 2021).

Tabla 2: instrumentos de protección adicional a los consumidores. Elaboración propia en base a la información de los portales de gobierno de Argentina, Brasil y Chile

Nombre (país)	Descripción	Grupo destinatario
Tarifa Social (Ar)	Descuento sobre las tarifas de electricidad y gas. La bonificación de la electricidad es del 50% con umbral de consumo de 150 kWh/mes para todo el país y 300 kWh/mes para la región del noroeste. La bonificación del gas por red es del 75% con un umbral de consumo equivalente a la categoría más baja del consumo residencial según zona tarifaria. Surge en el año 2016	Hogares de ingresos bajos conectados formalmente al suministro. Asignación automática
Régimen de Zonas Frías (Ar)	Descuento sobre las tarifas de gas natural y sobre el precio de las garrafas de GL en las subzonas o localidades que presentan las temperaturas más bajas del país. Surge en el año 2002 y se modifica en el año 2021.	Universal. Todos los hogares de las subzonas alcanzadas por la Ley 25565 y las añadidas por la Ley 27.637.
Electrodependientes (Ar)	Tarifario especial gratuito de electricidad para los usuarios que poseen enfermedades severas que necesiten de internación domiciliaria. También contempla la entrega de un grupo electrógeno, previa solicitud, por parte de las empresas domiciliarias, incluyendo los costos de funcionamiento asociados. Surge en el año 2017.	Condiciones de riesgo de salud. Mediante inscripción y con una certificación médica que lo avale. Vigencia de dos años a partir de asignación, luego debe renovarse
Tarifa Social de Energía Eléctrica (Br)	Descuento sobre la tarifa de energía eléctrica que varía según el nivel de consumo. Con un umbral de consumo de 221 kWh/mes a partir de los cuales se anula el beneficio. Surge en el año 2002.	Beneficiarios de programas de asistencia social. Otorgamiento automático.
Equidad Tarifaria (Ch)	Mecanismo de subsidio cruzado que busca compensar la diferencia de precios entre las zonas menos pobladas del país con respecto a las grandes ciudades. Otorga bonificación variable según el factor de intensidad de cada comuna beneficiaria y una protección frente al recargo por moratoria de pago. Surge en el año 2016	Universal. Todos los hogares de las zonas beneficiadas.

Para el caso de Brasil existe escasa información sobre la aplicación de la tarifa social de energía eléctrica. Mazzone et al. (2021) sugieren que, en base al comportamiento del consumo eléctrico los años 2012 y 2016, la tarifa social podría ser muy efectiva en las familias más pobres con un consumo eléctrico muy bajo pero su protección resulta insuficiente para lograr que un hogar de ingresos bajos logre un consumo moderno asociado, por ejemplo, al uso de electrodomésticos para tareas del hogar y estudio.

El caso de la ley de equidad tarifaria chilena no asume los costos de los mecanismos de focalización según la comprobación previa de las condiciones de vida que requieren las políticas de tarifa social y considera los aspectos espaciales de las privaciones energéticas (Bouzarovski & Simcock, 2017). Los riesgos que se corren en el mecanismo de asignación son los sesgos hacia los hogares de zonas metropolitanas con un consumo eléctrico alto y la otorgación del beneficio a hogares de ingresos altos de zonas menos pobladas (Bustamante Morales, 2022).

Eficiencia energética en la vivienda e integración de energías renovables

La implementación de políticas de eficiencia energética e integración de energías renovables dirigidas a los hogares vulnerables ocupan un lugar central en las estrategias políticas para combatir a la PE (Bouzarovski, 2018; Cludius et al., 2018; Pye et al., 2017) al generar una sinergia entre los objetivos de las políticas sociales, energéticas y ambientales. Permiten focalizar en los hogares vulnerables reemplazando parcialmente subsidios a los combustibles fósiles, logra un mejor uso de la energía y, asociado a ello, reduce emisiones de gases de efecto invernadero.

Como se observa en la Tabla 3, de los cuatro programas identificados 3 pertenecen al caso chileno y, el restante, a Brasil. No se han identificado instrumentos que se enmarquen en esta categoría para Argentina.

Tabla 3: instrumentos EE en la vivienda e integración de ER. Elaboración propia en base a la información de los portales de gobierno de Brasil y Chile

Nombre (país)	Descripción	Grupo destinatario
Minha Casa Minha Vida (Br)	Subsidio a la adquisición de vivienda o departamento propio que incluye la integración de energías renovables en el ámbito doméstico para generación eléctrica o térmica. Surge en el año 2009	Hogares de ingresos medios y medio-bajos de todo el país. Categorías prioritarias según vulnerabilidad (social, económica, ambiental)
Recambio de calefactores (Ch)	Provee calefactores eficientes y menos contaminantes, a partir del intercambio del antiguo calefactor y/o cocina instalada previamente. Se ejecuta en diversas regiones según el llamado y la licitación. Surge en el año 2014	Universal. Según el llamado de cada región, mediante inscripción. Se requiere contar con el calefactor previamente instalado en la vivienda.
Recambia tu calor (Ch)	Incentivos en base a descuentos sobre la tarifa eléctrica para consumo asociado a la calefacción en estaciones frías del año, con la finalidad de ofrecer una alternativa competitiva a la leña y que sea menos contaminante. Surge en el año 2021	Universal. Según el llamado de cada región, mediante inscripción.
Habitabilidad Rural (Ch)	Mejoras en el entorno inmediato de las viviendas de hogares rurales o urbanas que no superen los 5000 habitantes. Contempla mejoras en el acondicionamiento térmico de las viviendas e integración de energías renovables Surge en el año 2016	Viviendas precarias de zonas rurales y urbanas con poblaciones pequeñas. Asignación mediante inscripción.

Tanto los programas “Minha Casa Minha Vida” de Brasil tiene una relación indirecta, desde la perspectiva de los efectos esperados, en las dimensiones de la PE. Se trata de una política de tipo habitacional que en los últimos años contempla la integración de tecnologías basadas en energías renovables en los proyectos de viviendas¹.

En el caso chileno se observa que los programas Recambio de calefactores y Recambia tu calor no presentan a priori ningún criterio de vulnerabilidad (socioeconómica, espacial, de discapacidad, de género) en la definición de sus destinatarios. Asimismo, este último programa se considera en esta categoría y no en la de protección adicional a los consumidores (puesto que es un esquema de bonificación en la tarifa de electricidad) porque la finalidad del instrumento es la de ahorrar energía en y reducir emisiones en zonas de Chile donde el consumo de leña es significativamente elevado.

Por otro lado, el instrumento Habitabilidad Rural tiene una relación directa con el fenómeno de la PE, considera criterios de vulnerabilidad espacial y confortabilidad térmica de las viviendas, así como también la integración de energías renovables, proponiendo una relación de co-beneficios entre las dimensiones sociales y ambientales.

Ampliación y regularización del acceso

Las políticas enmarcadas en esta categoría tienen especial relevancia para el contexto latinoamericano, en donde el acceso y la calidad de la energía no pueden darse por sentado como ocurre en los países desarrollados. Ejemplo de ello es que, generalmente en los estudios de políticas orientadas a combatir los efectos de la PE para los países europeos no contemplan a los programas de electrificación rural como uno de ellos dado que, por el desarrollo de infraestructura y la extensión territorial más pequeña,

¹ Fuente: <https://epbr.com.br/entenda-o-que-esta-em-jogo-na-nova-lei-que-preve-paineis-solares-no-minha-casa-minha-vida/>.

el nivel de acceso a energías modernas y de calidad es elevado tanto para los espacios rurales como urbanos.

Tanto Argentina como Brasil y Chile coinciden en que tienen programas de electrificación rural que comenzaron desde finales de la década de los '90 y principios de los 2000. Como estas medidas por lo general son de largo plazo e implican una inversión de capital, en todos los casos fueron financiadas por organismos multilaterales de financiamiento.

Tabla 4: instrumentos de ampliación y regularización del acceso. Elaboración propia en base a la información de los portales de gobierno de Argentina, Brasil y Chile

Nombre (país)	Descripción	Grupo destinatario
PERMER (Ar)	Provee de electricidad generada con fuentes renovables a hogares, instituciones públicas, comunidades aglomeradas y pequeños emprendimientos productivos. Surge en el año 1998	Comunidades rurales dispersas. Asignación mediante unidades ejecutoras.
PROINEN (Ar)	Realización de obras que permitan lograr un acceso seguro a la electricidad en los asentamientos poblacionales que no lo tienen. Surge en el año 2015	Barrios o asentamientos sin conexión eléctrica formal y segura.
Luz Para Todos (Br)	Provee electricidad a poblaciones rurales que no poseían el acceso previo a este servicio público a partir del desarrollo de obras e infraestructura. Surge en el año 2003	Hogares que residan en zonas rurales y urbanas de baja población sin conexión a la electricidad por red.
Ruta de la Luz (Ch)	Programa de electrificación rural a partir de la extensión de tendido eléctrico y desarrollo de infraestructura. Contempla tecnologías basadas en energías renovables, pero no se limita a ello. Surge en el año 1994 bajo el nombre de Programa de Electrificación Rural.	Hogares rurales sin acceso a electricidad.

El Programa de Inclusión Eléctrica Nacional (PROINEN) resulta el único en este grupo que no se circunscribe al espacio rural o urbano con población pequeña. En el documento de su creación (Decreto 516/2015) se destaca el reconocimiento de la energía como un bien esencial para el desarrollo social y regional que resulta necesario garantizar en condiciones de seguridad. Esto se vincula con la realidad de los barrios o asentamientos informales que no logra ser capturada por la cobertura estadística utilizadas en la definición de los indicadores de la PE (Lopera et al., 2023).

El otro instrumento argentino en este grupo, el Programa de Electrificación de Mercados Rurales (PERMER) tiene incidencia en las privaciones domésticas consideradas en el fenómeno de la PE, aunque el programa no se limita al ámbito del hogar, sino que contempla instituciones educativas, servicios de salud y redes comunitarias.

Tanto el caso brasilero como el chileno presentan programas de electrificación rural que no se limitan en energías renovables, sino que implican también electricidad producida por fuentes no renovables a partir de inversiones de infraestructura. En ambos casos han tenido una incidencia positiva en elevar el nivel de acceso físico a la electricidad durante los últimos 20 años acercando casi a niveles universales tanto para Brasil (Mazzone, 2021) como para Chile (Ministerio de Energía, 2022).

Información y sensibilización

La última categorización, vinculada con las campañas de concientización y sensibilización, suele ser la menos comunes entre los diferentes tipos de instrumentos de incidencia en la PE (Kyprianou et al., 2019). Como sugieren Cludius et al. (2018), la eficacia de cualquier política dirigida a aliviar la PE depende en gran medida de que la información sobre esos planes esté fácilmente disponible para sus grupos objetivo. Particularmente los instrumentos de provisión de información ofrecen la ventaja de que pueden operar directamente sobre las causas de la PE y convertirse en una ayuda adecuada cuando se adaptan a las necesidades de los hogares y condiciones locales específicas.

Si bien, tanto Argentina como Brasil cuentan con campañas de provisión de información y concientización de aspectos relativos a la eficiencia energética, en ningún caso estos consideran explícitamente alguna de las situaciones de privación social y material asociadas a la PE, ni contemplan ningún criterio de vulnerabilidad en su ejecución.

El único instrumento identificado que se enmarca en esta categoría pertenece a Chile. Es el caso del “Con buena energía”, un programa de formación ciudadana en materia de eficiencia energética a nivel residencial que entrega certificaciones de asistencia y un pack de artefactos eficientes como alargadores múltiples y lámparas de bajo consumo. El grupo destinatario se define como aquellos hogares inscritos en el Registro Social de Hogares del Ministerio de Energía en tramos de 0 a 70% de menores ingresos, siendo la selección de los participantes realizada por las Municipalidades y Gobernaciones con quienes el Ministerio de Energía cuenta con convenio vigente².

El programa fue lanzado en el año 2009. Resulta interesante la vinculación entre las condiciones de vulnerabilidad socioeconómica y bajos niveles de eficiencia energética que se encuentra subyacente desde su formulación, aún más de diez años antes de que en el país se publicara un reconocimiento formal de la PE.

CONCLUSIONES

Este estudio, de carácter exploratorio, realizó un recorrido por las políticas y medidas nacionales en relación con el fenómeno de la PE para los casos de Argentina, Brasil y Chile mediante la aplicación de una metodología de clasificación relativa a la evaluación cualitativa basada en la teoría. Se identificaron y caracterizados 17 programas en ejecución, de los cuales 15 se enmarcan en el ámbito de la política energética y 2 en las políticas habitacionales.

En lo que respecta a los esquemas de protección a los consumidores, existe cierta concordancia con lo visto en los antecedentes para los estudios de políticas en el contexto de países europeos, en donde este tipo de medidas es una de las que más atención recibe por parte de los gobiernos (Kyprianou et al., 2019; Pye et al., 2017). Los desafíos más grandes en este ámbito para los países estudiados es el de mejorar la definición de grupo objetivo y focalización de los esquemas de bonificaciones sobre las tarifas de manera que resulte asequible y equitativo.

Por otro lado, las medidas de ampliación y regularización del acceso, añadida en base a las particularidades de las privaciones energéticas en el contexto de América Latina, concentran también una buena cantidad de instrumentos. Son destacables en este sentido los programas de electrificación rural que se aplicaron en los tres países, y que han tenido un papel preponderante para garantizar el acceso universal a la energía.

Se observa que las medidas de eficiencia energética e integración de energías renovables para hogares vulnerables son un ámbito con potencial en el que los países latinoamericanos podrían desarrollar de cara al futuro. Si bien en esta categoría se identificaron 4 instrumentos, abordan en su mayoría tangencialmente a los aspectos determinantes de la PE.

Por último, los mecanismos de provisión de información y sensibilización permanecen casi inexplorados para los países seleccionados, como es esperable, al tratarse de países donde el interés formal en la PE es aún incipiente. Existen varios incentivos para que se implementen estos tipos de instrumentos como ser que necesitan de menos recursos, ofrecen al mismo tiempo soluciones en el corto y largo plazo (Cludius et al., 2018).

De cara a investigaciones futuras, sería pertinente avanzar hacia la estimación de variables proxy de la PE (Thema & Vondung, 2020) para los países del continente que permitan establecer equivalencias válidas, y avanzar sobre la evaluación de impacto de las políticas a partir de la información estadística disponible .

² Fuente: <https://www.mienergia.cl/oportunidades-y-beneficios/programa-con-buena-energia>.

REFERENCIAS

- Alvial-Palavicino, C., & Ureta, S. (2017). Economizing justice: Turning equity claims into lower energy tariffs in Chile. *Energy Policy*, *105*, 642-647. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.013>
- Amigo, C., Araya, P., Billi, M., Calvo, R., Oyarzún, T., & Urquiza, A. (2018). *Políticas públicas y pobreza energética en Chile: ¿una relación fragmentada?* Red de Pobreza Energética.
- Bednar, D. J., & Reames, T. G. (2020). Recognition of and response to energy poverty in the United States. *Nature Energy*, *5*(6), Article 6. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0582-0>
- Boardman, B. (1991). Fuel poverty is different. *Policy Studies*, *12*(4), 30-41. <https://doi.org/10.1080/01442879108423600>
- Bouzarovski, S. (2018). Energy Poverty Policies at the EU Level. En S. Bouzarovski (Ed.), *Energy Poverty. (Dis)Assembling Europe's Infrastructural Divide* (pp. 41-73). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69299-9_3
- Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, *10*, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- Bouzarovski, S., Petrova, S., & Sarlamanov, R. (2012). Energy poverty policies in the EU: A critical perspective. *Energy Policy*, *49*, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.033>
- Bouzarovski, S., & Simcock, N. (2017). Spatializing energy justice. *Energy Policy*, *107*, 640-648. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.064>
- Bustamante Morales, C. C. (2022). *Análisis de la eficiencia de la equidad tarifaria* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189833>
- Canese, M. (2013). *La tarifa social de la energía en América Latina y el Caribe*. <https://www.olade.org/publicaciones/la-tarifa-social-de-la-energia-en-america-latina-y-el-caribe/>
- Cludius, J., Hünecke, K., Noka, V., Schumacher, K., Förster, H., Kunert, D., & Fries, T. (2018). *Policy instruments and measures to alleviate energy poverty in Germany—Learning from good practices in other European countries*. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/publikationen/p-details>
- Croon, T. M., Hoekstra, J. S. C. M., Elsinga, M. G., Dalla Longa, F., & Mulder, P. (2023). Beyond headcount statistics: Exploring the utility of energy poverty gap indices in policy design. *Energy Policy*, *177*, 113579. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113579>
- Durán, R. J., & Condori, M. A. (2021). *Alcance de la tarifa social sobre los hogares en situación de pobreza energética de la Argentina urbana en el periodo 2016—2018*. <https://doi.org/10.37838/unicen/est.29-075>
- Enzensberger, N., Wietschel, M., & Rentz, O. (2002). Policy instruments fostering wind energy projects—A multi-perspective evaluation approach. *Energy Policy*, *30*(9), 793-801. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00139-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00139-2)
- González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.013>
- Harmelink, M., Joosen, S., & Blok, K. (2005, enero 1). The theory-based policy evaluation method applied to the ex-post evaluation of climate change policies in the built environment in the Netherlands. *Summer Study*. ECEEE.
- Howlett, M. (2004). Beyond Good and Evil in Policy Implementation: Instrument Mixes, Implementation Styles, and Second Generation Theories of Policy Instrument Choice. *Policy and Society*, *23*(2), 1-17. [https://doi.org/10.1016/S1449-4035\(04\)70030-2](https://doi.org/10.1016/S1449-4035(04)70030-2)
- Ibáñez Martín, M., Guzowski, C., Maidana, F., Ibáñez Martín, M., Guzowski, C., & Maidana, F. (2020). Pobreza energética y exclusión en Argentina: Mercados rurales dispersos y el programa PERMER. *Revista Reflexiones*, *99*(1), 40-71. <https://doi.org/10.15517/rr.v99i1.35971>
- Jannuzzi, G. (2010). Energy poverty and technology leap-frogging: A look at end-use efficiency programs for low income households in Brazil. *Geopolitics of Energy*, *32*, 51-56.
- Kerr, N., Gillard, R., & Middlemiss, L. (2019). Politics, problematisation, and policy: A comparative analysis of energy poverty in England, Ireland and France. *Energy and Buildings*, *194*, 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.002>
- Kyprianou, I., Serghides, D. K., Varo, A., Gouveia, J. P., Kopeva, D., & Murauskaite, L. (2019). Energy poverty policies and measures in 5 EU countries: A comparative study. *Energy and Buildings*, *196*, 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.003>

Lascoumes, P., & Le Gales, P. (2007). Introduction: Understanding Public Policy through Its Instruments—From the Nature of Instruments to the Sociology of Public Policy Instrumentation. *Governance*, 20(1), 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0491.2007.00342.x>

Lopera, D. F., Durán, R., & Condorí, M. (2023). Acceso a la energía en barrios populares en Argentina: Una aproximación para caracterizar la pobreza energética en el espacio urbano. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 50, 29-35.

Mazzone, A. (2021). A multidimensionalidade da pobreza no Brasil: Um olhar sobre as políticas públicas e desafios da pobreza energética. *Revista Brasileira de Energia*. <https://doi.org/10.47168/rbe.v27i3.644>

Middlemiss, L. (2017). A critical analysis of the new politics of fuel poverty in England. *Critical Social Policy*, 37(3). <https://doi.org/10.1177/0261018316674851>

Ministerio de Energía. (2022). *Ruta de la Luz. Uniendo Chile con energía*.

Murphy, L., Meijer, F., & Visscher, H. (2012). A qualitative evaluation of policy instruments used to improve energy performance of existing private dwellings in the Netherlands. *Energy Policy*, 45, 459-468. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.056>

Okushima, S. (2017). Gauging energy poverty: A multidimensional approach. *Energy*, 137, 1159-1166. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.137>

Pelz, S., Pachauri, S., & Groh, S. (2018). A critical review of modern approaches for multidimensional energy poverty measurement. *WIREs Energy and Environment*, 7(6), e304. <https://doi.org/10.1002/wene.304>

Pye, S., Dobbins, A., Baffert, C., Brajković, J., Deane, P., & De Miglio, R. (2017). Chapter 30 - Energy Poverty Across the EU: Analysis of Policies and Measures. En M. Welsch, S. Pye, D. Keles, A. Faure-Schuyler, A. Dobbins, A. Shivakumar, P. Deane, & M. Howells (Eds.), *Europe's Energy Transition* (pp. 261-280). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809806-6.00030-4>

Pye, S., Dobbins, A., Baffert, C., Brajkovic, J., Miglio, R., & Deane, P. (2015). *Energy poverty and vulnerable consumers in the energy sector across the EU: Analysis of policies and measures*. INSIGHT_E.

Salamon, L. M. (2002). *The Tools of Government: A Guide to New Governance*. Oxford University Press.

Simcock, N., Frankowski, J., & Bouzarovski, S. (2021). Rendered invisible: Institutional misrecognition and the reproduction of energy poverty. *Geoforum*, 124, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.05.005>

Sovacool, B. K. (2015). Fuel poverty, affordability, and energy justice in England: Policy insights from the Warm Front Program. *Energy*, 93, 361-371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.016>

Thema, J., & Vondung, F. (2020). *EPOV Indicator Dashboard: Methodology Guidebook*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

Urquiza, A., Amigo, C., Billi, M., Calvo, R., Labraña, J., Oyarzún, T., & Valencia, F. (2019). Quality as a hidden dimension of energy poverty in middle-development countries. Literature review and case study from Chile. *Energy and Buildings*, 204, 109463. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109463>

Weiss, C. H. (1997). Theory-Based Evaluation: Past, Present, and Future. *New Directions for Evaluation*.

Zabaloy, M. F., Ibáñez Martín, María María, M., & Martínez, C. K. (2023). Desigualdad energética y políticas públicas: Un análisis inicial para Argentina. *Asociación Argentina de Economía Política*, 1-28. <https://aaep.org.ar/?p=5950>

INSTRUMENTS TO CONFRONTING ENERGY POVERTY IN LATIN AMERICA: THE CASES OF ARGENTINA, BRAZIL, AND CHILE

ABSTRACT: Energy poverty has received increasing attention in the global public policy arena in recent years. Different countries have developed strategies to address it, estimate it and define policy instruments aimed at confronting it. In the case of Latin American countries, the study and knowledge on energy poverty is incipient, however, it is possible to identify measure addressing in some of its dimensions. This paper examined the national energy poverty policies for Argentina, Brazil, and Chile using a theory-based evaluation methodology. Eighteen programs were identified for the three countries,

more than half of which are framed in policy advocacy in the dimension of access and affordability of energy services. It is concluded that both energy efficiency policies for vulnerable households and mechanisms for providing information and raising awareness are two of the areas where the countries studied should focus on in the future, as they offer more sustainable, less costly solutions that operate simultaneously in the short and long term.

Keywords: energy poverty, policy instruments, Latin America

CARACTERIZACIÓN DE PATRONES DE CONSUMO ELÉCTRICO E INSERCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN EDIFICIOS UNIVERSITARIOS

Pedro Chevez¹, Javier Viñuela¹, Emilia Urteneche¹, Santiago Fondoso¹ e Irene Martini¹

¹Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC CONICET-UNLP).
+ (0221) 423-6587 INT.250 iipac@fau.unlp.edu.ar <http://www.fau.unlp.edu.ar/>

RESUMEN: El presente trabajo aborda la caracterización de las curvas de carga eléctricas de dos sectores de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata y el análisis de la instalación de dos sistemas fotovoltaicos (FV) para su cobertura. El primer sector está destinado al área de investigación y el segundo a aulas. Las mediciones empíricas de la demanda eléctrica se tomaron durante el año 2022 con un intervalo de una hora. Los resultados permitieron identificar patrones característicos en la utilización de electricidad en dos edificios con distintos usos, en cuanto a sus sistemas de climatización, iluminación, horarios de funcionamiento, etc., y, además, estimar de manera precisa (con paso horario) la cobertura directa que tendría la demanda a partir de la energía generada por un sistema FV, la energía a tomar de la red pública y la energía excedente del FV para cada caso.

Palabras clave: curva de carga, medidor inteligente, edificio educativo y energía fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN:

Los edificios demandan alrededor de un 40-45% de la energía a nivel mundial (Tathagat y Dod, 2015), por lo que la identificación de los patrones de consumo para la implementación de medidas de eficiencia energética y la inserción de energías renovables son fundamentales para alcanzar una reducción en la utilización de fuentes fósiles y, así, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. En esta línea, los edificios educativos en general, y los de enseñanza superior en particular, presentan consumos energéticos significativos, por lo que se convierten en edificios relevantes para la intervención y el mejoramiento energético.

En esta línea, es posible identificar diversos trabajos científicos a nivel internacional que abordan el estudio de los patrones de consumo en universidades y edificios educativos en general. Bastida-Molina et al. (2023) desarrollaron un código computacional para analizar el consumo eléctrico en universidades y utilizan como ejemplo el campus de Albacete la Universidad de Castilla-La Mancha. Yang et al. (2023) investigaron los patrones y los factores que influyen en el consumo eléctrico de residencias universitarias durante el verano en China e identificaron que el género resultó ser un factor importante en la determinación del consumo de base, mientras que el piso (altura), la ocupación y la ubicación de la habitación eran determinantes en el consumo por refrigeración. En la misma línea, Zhou et al. (2021) evalúa un conjunto de características similares, donde identifican la efectividad de ciertos incentivos para el ahorro energético. Chen et al. (2023) desarrollaron un modelo predictivo para estimar la demanda mensual en la biblioteca YunTech a partir de conjuntos limitados de datos de consumo eléctrico. En tanto, en el trabajo de Samuels y Booyesen (2019) se describe un experimento de comportamiento controlado llevado a cabo en cinco colegios en Sudáfrica. Allí, se proporcionaron informes diarios, semanales y mensuales de carácter visual e intuitivo a tres de los colegios, y los otros dos actuaron como controles. Los tres colegios que tuvieron los informes lograron ahorros económicos de entre un 11 y 15%.

En relación al estudio de la energía en edificios educativos universitarios, en Argentina se está llevando a adelante el Proyecto Federal de Eficiencia Energética Universitario (PROFEE). Este se centra en el

análisis del consumo de energía eléctrica en instituciones de educación superior y en la evaluación del impacto de la generación a partir de fuentes renovables sobre dichas instituciones y el medio ambiente. En este sentido, el proyecto pretende realizar diagnósticos energéticos en cada una de las instituciones intervinientes a fin de identificar cómo se desagregan los consumos eléctricos (iluminación, climatización, equipos especiales, etc.) y cuáles son sus factores determinantes (clima, usuarios, según el tipo de actividad y bandas horarias). Los datos relevados son procesados para obtener información sistematizada y determinar los perfiles de consumo de energía eléctrica de los edificios que conforman la red. Esto permitirá identificar oportunidades de mejora de la eficiencia energética y las posibilidades de incorporar sistemas de generación fotovoltaica. A su vez, esta información permitirá diseñar e implementar campañas de sensibilización sobre el uso energético en las instituciones (PROFEE, 2023). En la actualidad, el proyecto cuenta con la participación activa de veintisiete universidades, distribuidas en catorce provincias. En un paso significativo hacia la implementación del proyecto, algunas de estas instituciones han sido provistas con contadores trifásicos, los cuales desempeñarán un papel fundamental en el inicio del proceso de mediciones y análisis.

En este marco, la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata (FAU-UNLP), representada en el proyecto PROFEE por el Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC CONICET-UNLP), recibió dos contadores trifásicos inteligentes. A partir de su instalación a fines de 2021 y de la recolección de los datos con paso horario un año más tarde, se elaboró el presente trabajo de investigación que tiene por objetivo reconstruir las curvas de carga eléctricas de dos sectores de la institución, un bloque de investigación y un bloque de aulas, y establecer conclusiones en cuanto a sus patrones de consumo y sus determinantes; como así también analizar la eventual instalación de un sistema fotovoltaico para cada sector.

METODOLOGÍA

En el marco del mencionado proyecto PROFEE, en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata (FAU-UNLP) se instalaron dos contadores trifásicos de conexión directa modelo CIRWATT 410-QD1A-A0B10 de la marca Circutor. Uno en el sector de investigación y el otro en el bloque de aulas P-8-9 (ver Figura 1). Los contadores son clase B en energía activa según Directiva Europea MID (EN 50470) o clase 1 según IEC-62053-21, cuentan con comunicaciones RS-232 y Ethernet, su rango de medida es $3 \times 230/400V$ y soporta corrientes de hasta 100A.



Figura 1. Instalación de los medidores inteligentes, a la izquierda el tablero del sector de investigación, a la derecha el tablero del aula P-8-9.

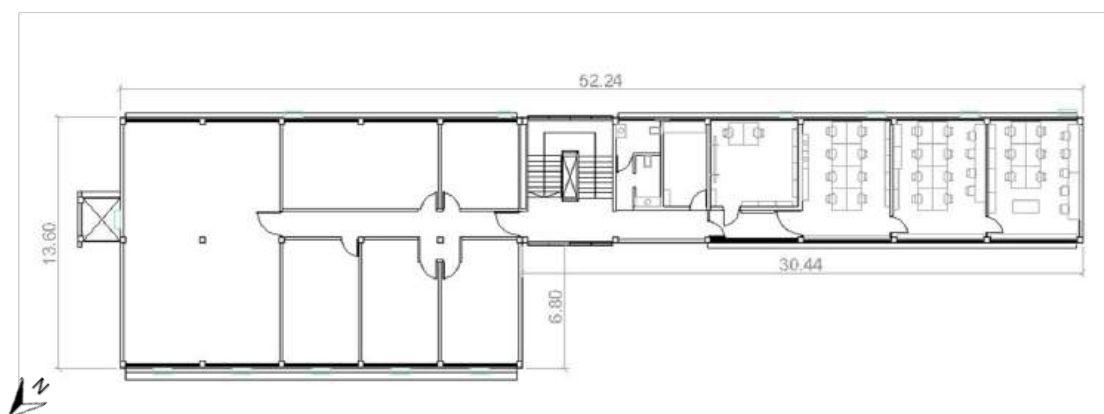
A continuación, se expone una breve descripción de los dos sectores estudiados.

En cuanto al sector de investigación (Figura 2), se trata de un área de 433 m^2 cubiertos y 39 m^2 semicubiertos y está ubicada en el último nivel de un bloque de tres plantas de aulas. El sector estudiado está constituido por institutos, laboratorios y centros de investigación en los que se desarrollan actividades de oficina, mientras que las actividades vinculadas a otro tipo de tareas de investigación como armado de prototipos y mediciones especiales se desarrollan en otras dependencias. También hay una oficina de administración, un módulo de baños individuales y un kitchenette. La envolvente es de

baja calidad termoenergética, con valores de transmitancia térmica de $1,72 \text{ W/m}^2\text{K}$ en muros; $1,83 \text{ W/m}^2\text{K}$ en cubierta y $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ en aberturas (para mayor detalle ver Tabla 1). Este sector no cuenta con gas natural, por lo que el sistema de climatización está resuelto mediante equipos de aire acondicionado individuales frío-calor. Además de los aires acondicionados, se identifica una gran presencia de computadoras fijas y portátiles, iluminación y equipos de refrigeración y calentamiento de agua como los equipos más importantes en cuanto a consumo. En la Tabla 2 se detalla un listado aproximado de los equipos presentes en el sector a los efectos de caracterizar su comportamiento.

1 Área de Investigación

Planos



Imágenes



Figura 2. Planta e imágenes del sector de investigación de la FAU-UNLP.

En cuanto al bloque de aulas de posgrado, 8 y 9 (Figura 3), se trata de un edificio individual que consta de un subsuelo, donde se ubican nueve aulas de unos $40,9 \text{ m}^2$ cada una, una oficina de mantenimiento y un depósito; y dos niveles de aulas taller de 429 m^2 cada una (aula 8 en planta baja y aula 9 en primer piso). En planta baja se ubican dos baños y en el primer piso un depósito. En total consta de un área de 1469 m^2 cubiertos y 220 m^2 semicubiertos. La envolvente es de baja calidad termoenergética, con valores de transmitancia térmica de $1,72 \text{ W/m}^2\text{K}$ en muros; $1,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ en cubierta y $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ en aberturas (para mayor detalle ver Tabla 1). Este sector cuenta con un sistema de climatización para las aulas del subsuelo resuelto por medio de aires acondicionados individuales para cada espacio, totalizando 10 equipos. Por su parte, las aulas superiores 8 y 9 cuentan con calefacción por medio de estufas de tiro balanceado y ventiladores. Por su parte, se evidencia una importante demanda eléctrica a partir de la conexión de computadoras portátiles de los y las estudiantes durante las horas de clase, ya que las aulas 8 y 9 pueden albergar comisiones muy numerosas dada su superficie (aproximadamente 100 personas). En esta misma línea, la carga por iluminación puede resultar relevante dada la tarea a

desarrollar en el interior que puede ser el dibujo técnico, el dibujo a partir del uso diferentes técnicas, la corrección sobre planos impresos, escritura a mano, elaboración de maquetas, entre otras actividades. Para más detalle del equipamiento, ver Tabla 2.

2 Bloque Posgrado-Aulas 8 y 9



Figura 3. Plantas e imágenes del bloque del aula P-8-9 de la FAU-UNLP

A continuación, en la Tabla 1 se exponen las características de la envolvente de cada sector analizado.

Envolvente		
	Sector investigación	Aulas P-8-9
Muros	Ladrillo hueco de 18cm con revoque en ambas caras	Ladrillo hueco de 18cm con revoque en ambas caras
	1,72 W/m ² K	1,72 W/m ² K
Cubierta	Chapa acanalada, perfilera de chapa doblada, aislante de espuma de polietileno 1cm y cielorraso suspendido de placas roca de yeso	Chapa acanalada, perfilera de chapa doblada, poliestireno expandido 2cm y cielorraso lineal metálico
	1,83 W/m ² K	1,23 W/m ² K
Losa	Losetas pretensadas, contrapiso, carpeta y alisado de cemento	Losa hormigonada in situ, contrapiso y alisado de cemento
	2,06 W/m ² K	2,69 W/m ² K

Carpinterías	Perfiles de aluminio y vidrio simple	Perfiles de acero galvanizado y vidrio simple
	5,8 W/m ² K	5,8 W/m ² K
Tabla 1. Caracterización de la envolvente edilicia y del equipamiento eléctrico de los dos sectores analizados		

En la Tabla 2 se detalla un listado aproximado de los equipos presentes en el sector a los efectos de caracterizar sus comportamientos.

Equipamiento eléctrico				
	Sector Investigación		Aulas P-8-9	
	Cantidad	Pot. unitaria	Cantidad	Pot. unitaria
AA 5500 F/h	-	-	8	2000 W
AA 4500 F/h	10	1700 W	2	1700 W
AA 3000 F/h	2	1270 W	-	-
Ventiladores	-	-	4	280 W
Dispenser	2	1000 W	1	1000 W
PC escritorio	72	300 W	15	300 W
Proyector	-	-	5	350 W
Sistema de audio	-	-	2	80 W
PC portátil	5	120 W	Variable	120 W
Televisor LED 60"	-	-	3	200 W
Tubos fluorescentes	-	-	74	25 W
Tubos LED	88	18 W	70	18 W
Plafón LED	-	-	18	60 W
Pava/microondas	5	800 W	2	800 W
Secador de manos	-	-	2	800 W
Server	1	500W	1	500 W
Tabla 2. Caracterización de la envolvente edilicia y del equipamiento eléctrico de los dos sectores analizados.				

Los contadores trifásicos fueron configurados para tomar lecturas cada una hora y, para el presente trabajo se utilizaron los siguientes intervalos de medición: para sector de investigación se utilizaron datos desde el 1/1/2022 hasta el 14/12/2022; mientras que para el bloque de aulas P-8-9 se utilizaron datos desde el 29/1/2022 hasta el 28/1/2023. A partir de los datos medidos se construyen las curvas de demanda eléctrica anual, sobre las cuales se interpreta la posible incidencia de los usos. También se evalúa la monótona de carga horaria; la interacción entre el consumo y la temperatura a partir de datos horarios extraídos de la estación Davis Pro Vantage 2 localizada en la propia Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata. Por último, se construyen las curvas de carga promedio de días laborales para cada mes, sobre las cuales se obtienen conclusiones en relación a los patrones de uso identificados. Por último, se simula la inserción de un sistema fotovoltaico sobre ambos sectores a los efectos de evaluar la cobertura de la demanda para cada caso. Para ello se utiliza el software PVSol en su versión de prueba y se ensaya un sistema que se adecue a las características de la cubierta de cada sector.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones eléctricas de cada uno de los sectores y de las simulaciones de los sistemas fotovoltaicos.

Sector investigación

El sector investigación presentó un consumo eléctrico de 15380 kWh durante 2022 (32,6 kWh/año*m²). Su curva anual (Figura 4) refleja un comportamiento vinculado a un consumo de base conformado por las computadoras fijas, servicio de agua caliente/fría para consumo e iluminación que demanda unos 9728 kWh/año (63% del consumo total). Este consumo de base se estimó a partir de considerar la demanda de abril y de octubre como meses sin requerimientos de climatización. Por su parte, se observan dos picos anuales de consumo: el primero, y más importante, destinado a calefacción mediante aires acondicionados en los meses de invierno, que demanda unos 5131 kWh/año (33% del consumo total); y el segundo destinado a la refrigeración por medio de aires acondicionados en los meses de verano, que demanda unos 521 kWh/año – a excepción de enero que el establecimiento se mantiene cerrado- (4% del consumo total).

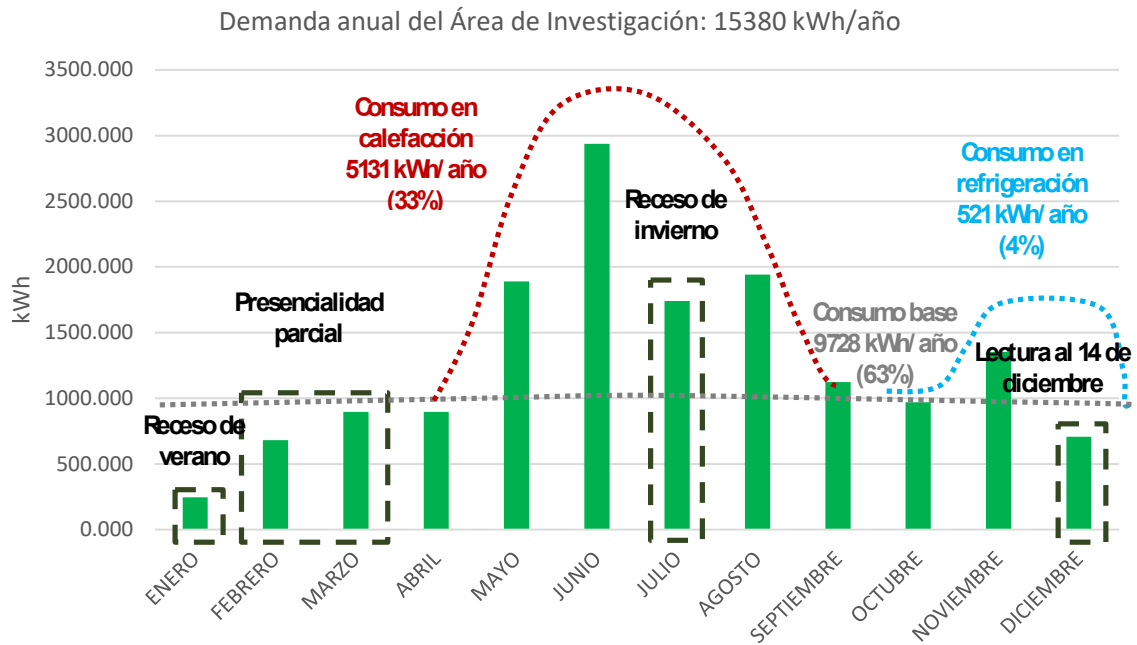


Figura 4. Demanda de electricidad mensual del sector de investigación de la FAU-UNLP

En cuanto al comportamiento horario anual, la monótona de carga refleja un consumo de aproximadamente 1 a 2,5 kW durante gran parte del año, mientras que se observan picos que van desde los 3,5 kW a los 18 kW durante aproximadamente un décimo de las horas del año (Figura 5). Este comportamiento se explica en la Figura 6, donde se observa que las demandas pico, que van de los 15 a 18 kW se alcanzaron cuando las temperaturas exteriores se mantuvieron en torno a los 10°C a 15°C, es decir que la demanda por calefacción es la que refleja mayores picos de potencia eléctrica. Por su parte, se identifican también consumos que superan los 10 kW de potencia en períodos donde la temperatura exterior es cercana o superior a los 30°C (Figura 6). En la Figura 6 también se observa que la mayoría de las horas del año hay un consumo de base de 1 a 2,5 kW, generado por la demanda de las computadoras, en el rango de temperaturas que va desde los 10 a los 30°C. En efecto, entre los tres gráficos y el reconocimiento del equipamiento instalado es posible identificar ciertos patrones de uso que caracterizan de forma notoria al sector estudiado y la actividad que allí se desarrolla.

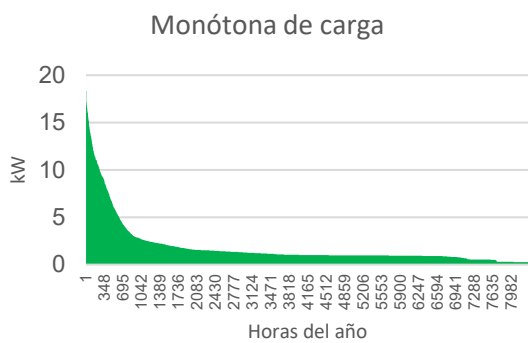


Figura 5. Monótona de carga del sector de investigación

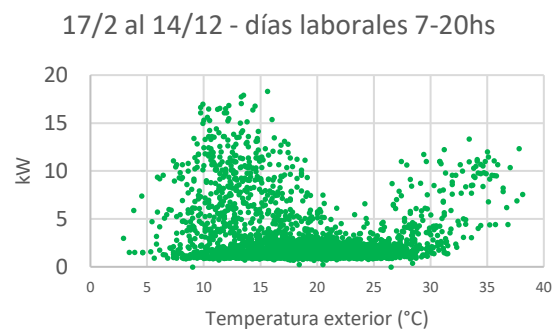


Figura 6. Interacción entre demanda eléctrica y temperatura exterior en el sector de investigación.

Por su parte, a partir de la reconstrucción de las curvas de carga con promedio para los días laborales de cada mes es posible verificar lo señalado previamente. En la Figura 7 se observa que las curvas diarias de todos los meses registran consumos que inician a las 8:00, alcanzan los picos de consumo durante el mediodía y cesan su actividad en horarios cercanos a las 19:00 hs. Por su parte, se observa que las curvas de los meses de junio y julio son las que alcanzan los valores pico máximos, entre 12 a 14 kW, dado que en dichos meses se registran las temperaturas más bajas del año. Por su parte, durante el mes de enero

se registra un consumo muy bajo por falta de actividad, seguido por los meses de febrero, marzo y diciembre, en los cuales se mantiene el comportamiento acampanado con un pico a mediodía. En este sentido, adelantando la posibilidad de insertar un sistema FV, es posible observar que las curvas de consumo acompañarán una eventual curva de generación solar, cuyo pico se alcanzará al mediodía; sin embargo, evaluando el comportamiento anual se identifica que durante el verano no se logrará un correcto aprovechamiento ya que habrá alta generación y baja demanda, mientras que en invierno sucederá lo contrario, es decir baja generación y alta demanda.

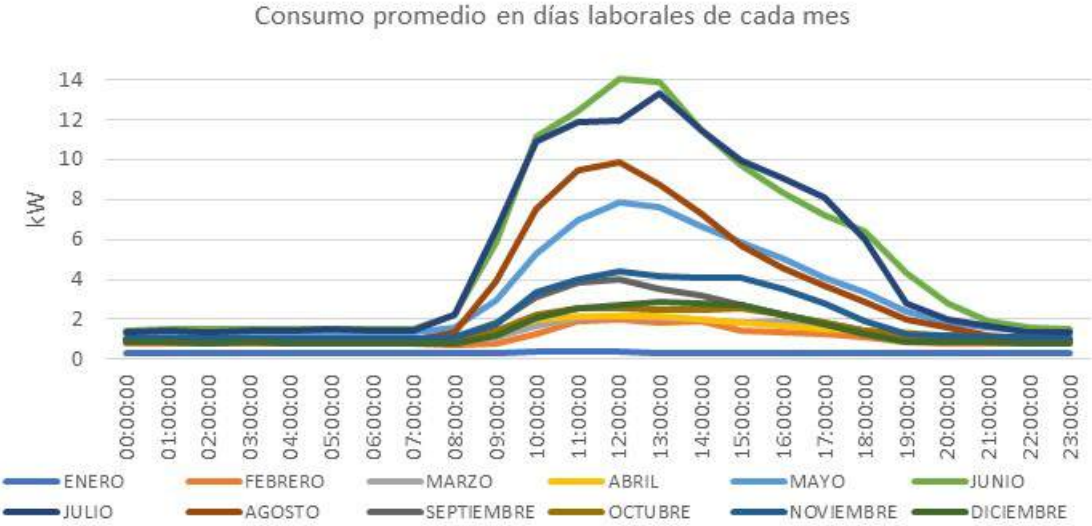


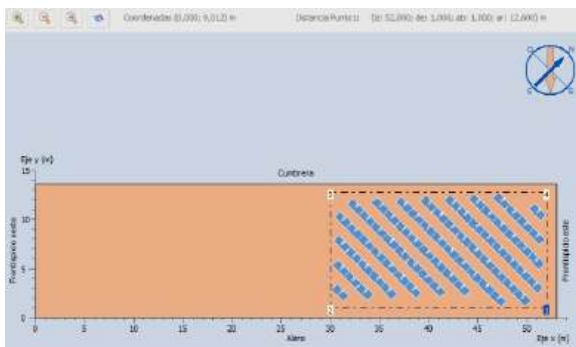
Figura 7. Curvas de carga promedio diarias por mes para el sector de investigación.

En efecto, la simulación del sistema FV (Tabla 3) consideró la utilización de un un sector de la cubierta de chapa acanalada de unos 300m², donde los paneles deberían ser instalados a 45° del borde del mismo y sobre soportes que se adecúan a la pendiente (Figura 8-1). El arreglo consta de 69 módulos de 300 Wp (de 1,68 m² cada uno y una eficiencia del 18,1%), que totalizan unos 20,7 kWp. Se simularon 3 inversores AEG trifásicos modelo AS-IC02-6000-2 con una potencia nominal de CC de 6kW cada uno y una potencia de CC máxima de 9kW cada uno (AEG, 2023). La energía generada anualmente sería de 35285 kWh (factor de carga del 19.5%) y supera ampliamente la demanda del sector (15380 kWh - coseno de fi= 99,5%-). A pesar de este gran superávit, por el desfase entre la demanda y la oferta renovable (Figura 8-2), la cobertura directa de la demanda por parte del FV alcanzaría un 58,5%, y el restante 41,4% de la energía requerida debería ser comprada a la red. Por su parte, el sistema inyectará unos 26119 kWh al resto de los edificios y/o a la red. Asimismo, si evaluamos días promedio de un mes frío y un mes templado con actividad académica (Figura 8-3 y 8-4) es posible identificar que en junio se lograría una cobertura prácticamente total de la demanda por medio del sistema FV; sin embargo, en el mes de marzo habría un considerable excedente de energía diario que sería direccionado a otros sectores del establecimiento, el campus universitario aledaño o a la red pública.

Orientación/ inclinación	Potencia	Cantidad de paneles (300 Wp)	Energía generada en el año	Demanda total anual	Demanda cubierta por FV	Demanda cubierta por red	Energía inyectada a la red	Emisiones CO ₂ evitadas
N/35°	20,7 kWp	69	35285 kWh	15380 kWh	58,6%	41,4,1%	26119 kWh	16,57

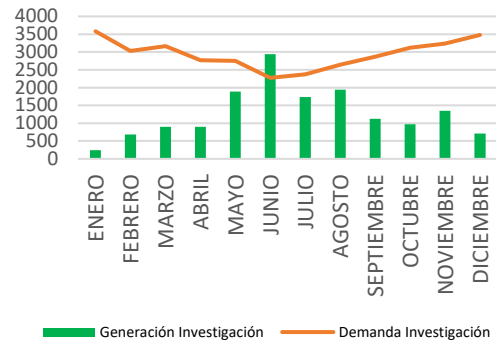
Tabla 3. Síntesis del sistema FV propuesto para el sector de investigación.

Superficie ocupada (300 m²)



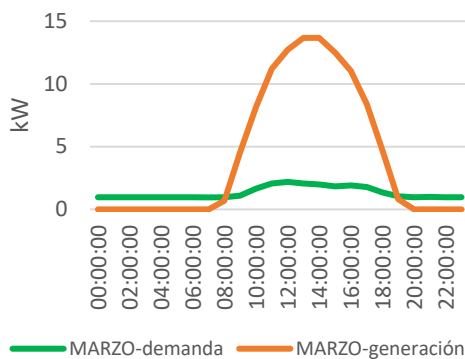
(8-1)

Demanda y generación mensual



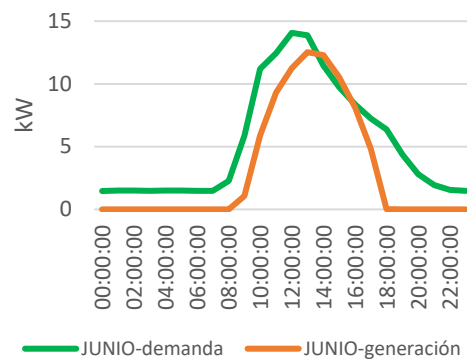
(8-2)

Demanda y generación marzo



(8-3)

Demanda y generación junio



(8-4)

Figura 8. Resultados de la simulación del sistema fotovoltaico en el sector de investigación. (8-1) Arreglo de paneles en la cubierta. (8-2) Generación FV y demanda mensual. (8-3). Generación FV y demanda un día laborable promedio de marzo. (8-4) Generación FV y demanda un día laborable promedio de junio.

Bloque aulas P-8-9

El sector del bloque de aulas P-8-9 presentó un consumo anual de 21287 kWh durante 2022 (12,6 kWh/año*m²). La curva anual (Figura 9) refleja un comportamiento acampanado, en donde los meses de invierno presentan las mayores demandas y los de verano las mínimas. En este sentido, hay que destacar que habitualmente los cursos de grado inician a mediados de marzo y terminan, en su gran mayoría, entre fines de octubre y principios de noviembre. Es decir, que durante este período se desarrollan clases en tres bandas horarias (8:30-12:00/13:30-17:00/17:30-21:00), en forma regular de lunes a viernes y sábados de 8:30-12:00. Por tal motivo se observan las principales demandas durante dichos meses. Por su parte, durante el resto del año se desarrollan actividades de posgrado, asesoramientos de trabajos finales, cursos, mesas de finales, entre otras opciones, las cuales tienen diferentes periodicidades. En este sentido, resulta complejo dividir los consumos por medio del gráfico de la Figura 9, aunque podría diferenciarse un consumo base determinado por los meses de febrero y noviembre (con un consumo de 16539 -77,7%-) y una demanda adicional durante el ciclo lectivo de marzo a noviembre (con un consumo de 4748 kWh -22,3%-), donde se infiere un mayor consumo por iluminación en concordancia con un requerimiento esporádico de calefacción en las aulas y las oficinas del subsuelo.

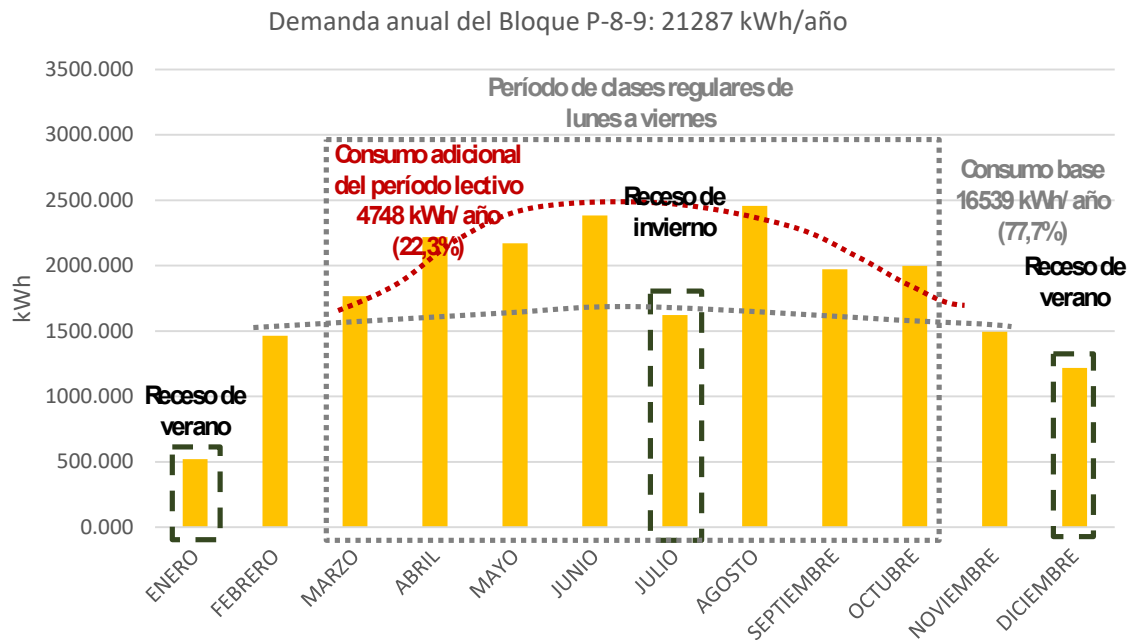


Figura 9. Demanda de electricidad mensual del bloque de aulas P-8-9 de la FAU-UNLP

En cuanto al comportamiento horario anual, la monótona de carga refleja un consumo de 0 a 0,5 kW durante un 7% del tiempo, de 0,5 a 2,5 kW durante un 70% del tiempo, mientras que se observan picos que van desde los 2,5 a los 4 kW y de los 4 a los 6 kW durante aproximadamente un 20% de las horas del año, mientras que las demandas máximas van desde los 6 a los 9 kW y se identifican en aproximadamente un 3% de las horas del año (Figura 10). Este comportamiento más homogéneo en cuanto a las demandas pico en comparación con el sector de investigación se ve reflejado en la Figura 10, donde se observa que la temperatura no presenta patrones claros en cuanto a la utilización de los sistemas de climatización eléctricos, tanto para invierno como para verano. La utilización aleatoria y/o esporádica de las aulas que cuentan con los equipos de aire acondicionado generan patrones de uso que no pueden correlacionarse directamente con la temperatura exterior, tal como sucedía en el sector de investigación. En la Figura 11 se pueden identificar potencias pico de 7,5 y 8,5 kW prácticamente en todos los rangos de temperatura exterior. Cabe señalar que los sistemas de iluminación del bloque demandan aproximadamente unos 4 kW, mientras que los equipos necesarios para las clases pueden sumar 1,5 kW, servidores (0,5 kW) y un único equipo de 6000 Frig/h (2 kW) bastan para alcanzar los picos de 8 kW. Es por ello que la temperatura no logra tener una incidencia directa sobre la curva de consumo general.

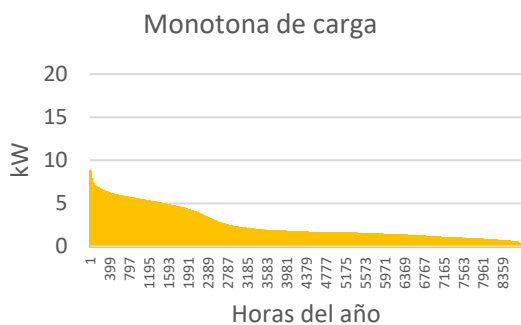


Figura 10. Monótona de carga del bloque de aulas P-8-9

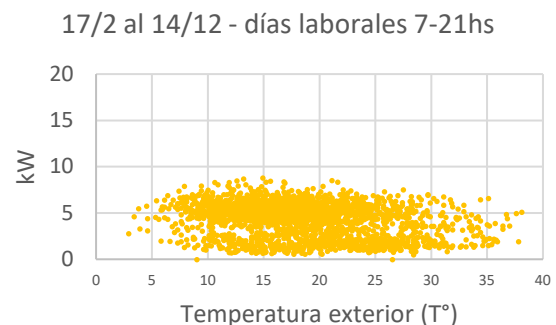


Figura 11. Interacción entre demanda eléctrica y temperatura exterior en el bloque de aulas P-8-9.

Por su parte, a partir de la reconstrucción de las curvas de carga promedio diarias para los días laborales de cada mes es posible verificar claramente las tres bandas horarias señaladas anteriormente (8:30-

12:00/13:30-17:00/17:30-21:00) identificándose tres “lomadas”, dentro de las cuales la de la mañana muestra un consumo más alto durante todos los meses probablemente debido al funcionamiento diario de la oficina del subsuelo (Figura 12). Se estima que la forma de cada una de las “lomadas” está originada por la conexión escalonada de computadoras portátiles a la hora del inicio de cada banda horaria y su desconexión escalonada durante la finalización de cada curso. Asimismo, es notorio que en la curva de febrero haya “lomadas” de consumo únicamente durante la mañana y la noche dado que el curso de ingreso que se dicta ese mes solo cuenta con esas opciones horarias. Por otro lado, en todas las curvas se identifica un consumo de base de 1,5 kW que se sostiene durante la madrugada, mientras no hay actividad, lo cual puede estar vinculado a la iluminación exterior, a un dispenser que se mantiene conectado, servidores y consumos standby. También se observa que las potencias máximas medias de cada mes tienen una estrecha vinculación con los valores de energía detectados en la demanda anual, encontrando los máximos valores en los meses de invierno. Así, en enero se observa un comportamiento diferente, con demandas eléctricas de 3,5 kW durante las tardes, vinculadas a actividades de mantenimiento. En cambio, las demandas medias máximas se obtienen en junio y agosto a las 11:00 hs, con valores de 7 kW. Nuevamente, considerando la posibilidad de insertar un sistema FV, es posible observar que las curvas de consumo estarían cubiertas marginalmente durante las bandas horarias de la mañana y la noche, por supuesto, al mismo tiempo que durante el verano no se logrará un correcto aprovechamiento ya que habrá alta generación y baja demanda, mientras que en invierno sucederá lo contrario, es decir baja generación y alta demanda.

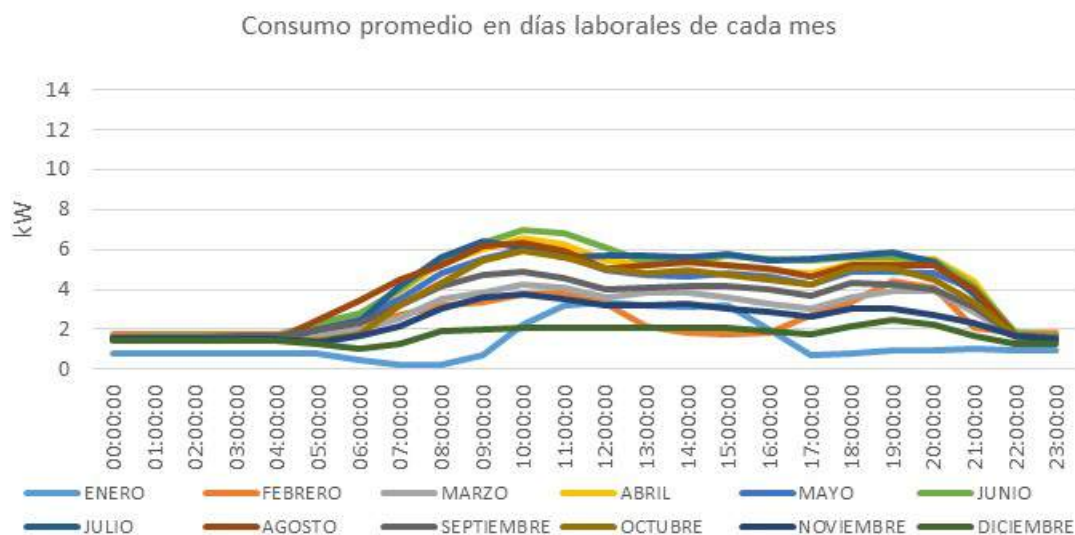


Figura 12. Curvas de carga promedio diarias por mes para el sector de investigación.

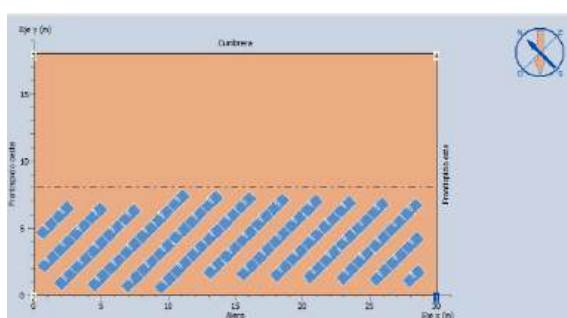
La simulación del sistema FV (Tabla 4) consideró la mitad de la cubierta disponible por motivos de obstrucciones por parte de árboles. La superficie utilizada es de 240m² y, nuevamente, este arreglo de paneles requeriría la instalación de soportes que permitan la orientación al Norte pleno y eludir la pendiente del techo Figura (13-1). El arreglo consta de 58 módulos de 300 Wp (de 1,68 m² cada uno y una eficiencia del 18,1%), que totalizan unos 17,4 kWp. Se simuló 1 inversor AEG trifásico modelo AS-IC02-15000-2 con una potencia nominal de CC de 15 kW y una potencia de CC máxima de 22.5 kW (AEG, 2023). La energía generada anualmente sería de 29796 kWh (factor de carga del 19,5%) y supera la demanda del sector (21287 kWh -coseno de $\phi=99.04\%$ -). Nuevamente, a pesar de haber un superávit energético, dado el desfase entre la demanda y la oferta renovable (Figura 13-2), la cobertura directa de la demanda por parte del FV alcanzaría un 47,9%, y el restante 52,1% debería ser comprado a la red. Por su parte, el sistema inyectará unos 19587 kWh al resto de los edificios y/o a la red. Asimismo, evaluando los días promedio de un mes frío y un mes templado con actividad académica (Figura 13-3 y 13-4) es posible identificar que en junio se lograría la cobertura de la demanda entre las 9:30 y las 15:30 por medio del sistema FV y se generaría un excedente a inyectar, mientras que se debería tomar energía de la red durante el resto del día. En cambio, en el mes de marzo se lograría cubrir la demanda entre las 8:00 y las 17:00 y se obtendría un considerable excedente de energía diario que sería direccionado a

otros sectores del establecimiento, el campus universitario o a la red, mientras que en la franja horaria nocturna se deberá tomar energía de la red o evaluar un sistema por acumulación en baterías.

Orientación/inclinación	Potencia	Cantidad de paneles	Energía generada en el año	Demanda total anual	Demanda cubierta por FV	Demanda cubierta por red	Energía inyectada a la red	Emisiones CO ₂ evitadas
N/35°	17,4 kWp	58	29796 kWh	21287 kWh	47,9%	52,1%	19587 kWh	14

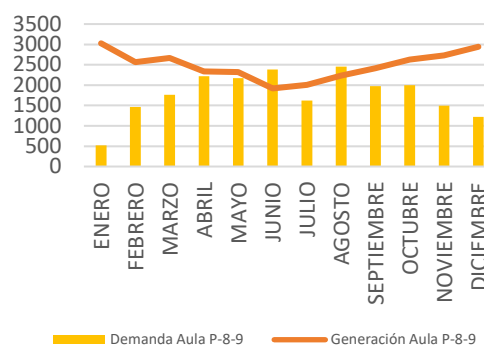
Tabla 4. Síntesis del sistema FV propuesto para el sector de aulas P-8-9

Superficie ocupada (300 m²)



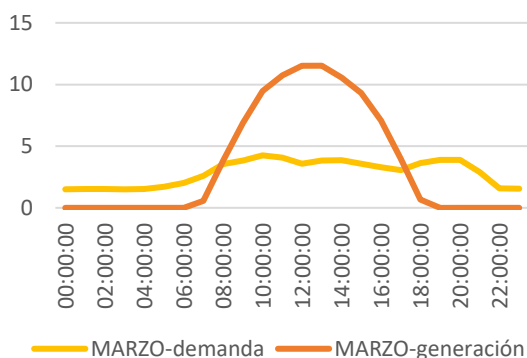
(13-2)

Demanda y generación mensual



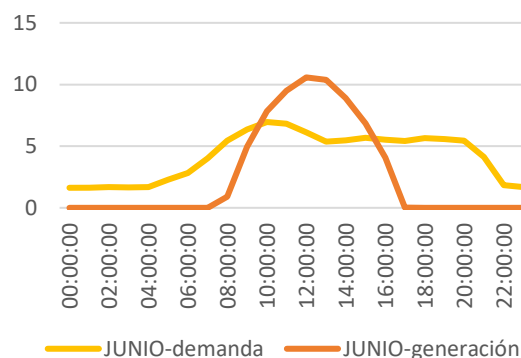
(13-2)

Demanda y generación marzo



(13-3)

Demanda y generación junio



(13-4)

Figura 13. Resultados de la simulación del sistema fotovoltaico en el bloque de aulas P-8-9. (13-1) Arreglo de paneles en la cubierta. (13-2) Generación FV y demanda mensual. (13-3). Generación FV y demanda un día laborable promedio de marzo. (13-4) Generación FV y demanda un día laborable promedio de junio.

CONCLUSIONES

El análisis realizado sobre dos sectores de la FAU-UNLP destinados a diferentes actividades académicas permitió identificar patrones de consumo particulares que se vinculan a las funciones que allí se desarrollan. Las intensidades energéticas indican que el sector investigación presentó una demanda de 32,6 kWh/año*m² y el aula P-8-9 una demanda de 12,6 kWh/año*m² debido a que: en el primer caso, el sector cuenta con un sistema de climatización por medio de aires acondicionados que se utilizan de manera regular de lunes a viernes en conjunto con computadoras fijas; mientras que en el segundo, si bien existen equipos de aire acondicionado para un sector de aulas de reducidas dimensiones en el subsuelo, estas tienen una utilización esporádica y las aulas de mayores dimensiones cuentan con estufas a gas, por lo que la demanda está principalmente asociada a los usos de iluminación y computadoras. En cuanto a los patrones de consumo anuales, se observó que ambos sectores presentan sus mayores demandas en invierno, aunque el sector de investigación muestra una curva mucho más pronunciada y, además, exhibe un cierto consumo para refrigeración. Por su parte, el bloque de aulas muestra una notoria incidencia de la duración del ciclo lectivo, reduciendo claramente su consumo en los meses

restantes. En cuanto a las monótonas de carga, el sector investigación denota picos de consumo que alcanzan los 18 kW, mientras que el bloque de aulas muestra picos que alcanzan los 9 kW. A pesar de ello, la demanda total anual fue de 15380 kWh para el primero y de 21287 kWh para el segundo. Estos valores nuevamente reflejan la dependencia del primer edificio con la climatización eléctrica, lo cual se verificó con el gráfico de dispersión energía-temperatura exterior; mientras que en el segundo no se identificaron vinculaciones claras entre estas variables. En las curvas diarias es posible identificar los comportamientos antes descritos, evidenciándose curvas muy acampanadas en los meses de invierno para el primer caso; mientras que se observan curvas más aplanadas para el segundo, donde se identifican claramente las bandas horarias en las que se desarrollan las actividades.

En cuanto a la instalación de sistemas FV, en ambos casos se ensayaron sistemas sin acumulación, lo cual resultó en coberturas directas de la demanda del 58,6% y 47,9% respectivamente. A futuro se requiere ensayar medidas de mejoramiento energético para reducir la demanda y alcanzar mayores coberturas o requerir menor potencia, dado que se identificó que la calidad de la envolvente es baja. También se requerirá ensayar sistemas FV que se integren de forma más armónica sobre los edificios (utilizando muros y aleros), considerar la demanda total del establecimiento para evaluar el destino de los excedentes de generación FV y estudiar el impacto de la utilización de baterías o sistemas de acumulación alternativos para dichos excedentes.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto Federal de Eficiencia Energética Universitaria (PROFEE) que proveyó los medidores inteligentes para realización del presente trabajo y a la FAU-UNLP por habilitar su instalación.

REFERENCIAS

- AEG (2023). AEG Grid-Tied Solar Inverters Technical Specifications. <https://acortar.link/5C6PME>
- Bastida-Molina, P.; Torres-Navarro, J.; Honrubia-Escribano, A.; Gallego-Giner, I.; Gómez-Lázaro, E. (2023). A detailed analysis of electricity consumption at the University of Castilla-La Mancha (Spain). *Energy and Buildings* (289), 113046.
- Chen, W.; Wang, C.; Merrett, H.; Liu, S.; Chang, J. (2023). Electricity consumption prediction - A case study of a university library. *Journal of Building Engineering* (76), 106990.
- PROFEE (2023). Proyecto Federal de Eficiencia Energética Universitaria. Resumen-documento interno.
- Samuels, J.A.; Booysen, M.J. (2019). Chalk, talk, and energy efficiency: Saving electricity at South African schools through staff training and smart meter data visualization. *Energy Research & Social Science* (56), 101212. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.05.022>
- Tathagat, D.; Dod, R. (2015). The inception and evolution of EIA and environmental clearance process—laying emphasis on sustainable development and construction. *Int. J. Eng. Res. Appl.* (5), pp. 22-28.
- Yang, H.; Ran, M; Zeng, P. (2023). Patterns and influencing factors analysis of electricity consumption in university dormitories based on balance point temperatures. *Building and Environment* (228), 109679. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109679>
- Zhou, Y.; Sun, L; Hu, X.; Ma, L. (2021). Clustering and statistical analyses of electricity consumption for university dormitories: A case study from China. *Energy and Buildings* (245), 110862, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110862>

CHARACTERIZATION OF ELECTRICITY CONSUMPTION PATTERNS AND INSERTION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN UNIVERSITY BUILDINGS

ABSTRACT: This paper deals with the characterization of the electrical load curves of two sectors of the Faculty of Architecture and Urbanism of the National University of La Plata and the analysis of the installation of two photovoltaic systems to cover them. The first sector is destined to the research area and the second to classrooms. Empirical measurements of electricity demand were taken during the year 2022 with an hourly interval. The results made it possible to identify characteristic patterns in the use of the buildings in terms of their air conditioning systems, lighting and operating hours, and to evaluate the feasibility of installing photovoltaic solar energy systems in these sectors.

Keywords: load curve, smart meter, educational building and photovoltaic energy.

CAMINO HACIA LA SUSTENTABILIDAD EMPRESARIAL: UN ANÁLISIS INTEGRAL DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL EN EMPRESAS DE LA CUENCA MATANZA RIACHUELO

Jonathan R. Morris¹, Analía B. Figueira^{1,2}, Martín Capasso¹, Cristina M. Lafflito¹

¹Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Lomas de Zamora

²Facultad de Ingeniería Universidad de Flores

Tel. +54 9 11 6848-2592 – e-mail: jmorrisinvestigacion@gmail.com.ar

RESUMEN: En un contexto donde la sostenibilidad y la eficiencia se convierten en imperativos empresariales, este estudio se adentra en la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR) para analizar las estrategias de gestión energética y ambiental en 46 empresas locales. El objetivo es evaluar la ejecución y resultados de estas prácticas en términos de rendimiento y sostenibilidad. Se utiliza un instrumento específico, el Cuestionario de Gestión Ambiental-Energética Territorial de la Facultad de Ingeniería UNLZ (CGAETE), para recopilar un conjunto de datos que abarcan aspectos como el perfil empresarial, tamaño, áreas operativas, conocimiento, canales de información preferidos, unidades internas especializadas, políticas corporativas, sistemas de gestión y roles responsables en esta materia. Los resultados señalan disparidades en la adopción y comprensión de prácticas sostenibles, con divergencias en la percepción de la gestión energética y ambiental. Las fuentes de información principales son plataformas en línea, instituciones educativas y capacitaciones internas. La existencia de unidades y políticas corporativas emerge como clave para la ejecución efectiva. Se identifica la influencia de sistemas de gestión y responsables exclusivos. El análisis insta a un abordaje integral y sostenible, para fortalecer políticas, sistemas y educación. El estudio aporta claridad sobre dinámicas regionales y orientación para avanzar en gestión energética y ambiental, en línea con las demandas de sustentabilidad industrial.

Palabras clave: Sostenibilidad empresarial, Gestión energética, Gestión ambiental, Cuenca Matanza Riachuelo, Prácticas sostenibles

INTRODUCCIÓN

En el actual contexto, caracterizado por una creciente preocupación ambiental y la imperiosa necesidad de establecer prácticas empresariales más sostenibles, la gestión energética y ambiental ha emergido como un factor de profundo interés en las estructuras organizativas a nivel global. ONU (2015). La búsqueda de estrategias que promuevan la eficiencia energética, mitigue el impacto medioambiental y contribuyan al desarrollo sostenible se ha convertido en una prioridad esencial para empresas de diversos sectores y tamaños. Zabaloy, M. F. (2020).

En este escenario, la región de la CMR en Argentina destaca como un ámbito de particular relevancia. Pasqualini MF (2019). Con una historia de desafíos ambientales complejos y una marcada presencia industrial, la adecuada gestión de los recursos energéticos y la reducción de los impactos en el entorno son elementos fundamentales en esta área (Corte Suprema de Justicia de la Nación, 2008). Las empresas que operan en esta región enfrentan la responsabilidad de adaptarse a prácticas que no solo sean económicamente viables, sino también sostenibles y respetuosas con su entorno.

El presente estudio se sumerge en este contexto dinámico y desafiante con el objetivo de examinar detalladamente las estrategias de gestión energética y ambiental implementadas por las empresas que conforman la CMR. El enfoque principal se centra en analizar cómo estas prácticas se traducen en

términos de eficiencia, sostenibilidad y resultados tangibles. La relevancia de este estudio radica en su capacidad para iluminar la situación actual de la gestión empresarial en esta región, e identificar prácticas exitosas, desafíos pendientes y oportunidades de mejora.

Para lograr este propósito, se ha llevado a cabo una encuesta exhaustiva en 46 empresas ubicadas en la CMR, que abarca una amplia variedad de sectores industriales y una diversidad de tamaños organizativos. A través del CGAETe, se ha recopilado información valiosa que aborda aspectos como la actividad económica, el tamaño de la empresa, el nivel de conocimiento en gestión energética y ambiental, las fuentes de información preferidas, la existencia de áreas internas especializadas, la implementación de políticas de gestión, la adopción de sistemas de gestión y la designación de responsables dedicados a estas áreas.

Los resultados de esta investigación proporcionan una visión integral de la gestión energética y ambiental en la región, permiten comprender cómo las empresas enfrentan los desafíos actuales y cómo se alinean con los objetivos de sostenibilidad a nivel local y global. Además, se espera que los hallazgos de este estudio sirvan como referencia para la toma de decisiones tanto en el ámbito empresarial como en la formulación de políticas públicas que impulsen la adopción de prácticas más sostenibles en la CMR.

METODOLOGIA

En el marco de este estudio, se emplea una metodología integral que involucra la aplicación de un cuestionario específico denominado "Cuestionario de Gestión Ambiental y Energética Territorial" (CGAETe), diseñado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ). Este se estructura en torno a una serie de preguntas destinadas a evaluar diversos aspectos de la gestión ambiental y energética en empresas ubicadas en la CMR. El CGAETe fue validado mediante el coeficiente alfa de Cronbach, Cronbach, L. J. (1951) una medida ampliamente utilizada para evaluar la consistencia interna y la confiabilidad de un cuestionario, Cortina, J. M. (1993). La validez y la consistencia del CGAETe se confirmaron a través de un análisis riguroso, cuyos resultados han sido expuestos en investigaciones previas. El autor, Morris et al (2022), ha demostrado la validación de la herramienta de recolección de datos de manera acertada y precisa en su publicación: "Relevamiento de gestión energética ambiental en la industria: validación de la herramienta de recolección de datos".

El cuestionario consta de una serie de preguntas diseñadas para obtener información detallada sobre aspectos clave de las organizaciones y su actividad. A continuación, se desarrollan los aspectos con una breve explicación de cada uno.

- **Perfil de la Empresa:** Esta sección busca recopilar información relevante sobre el tamaño, sector económico y ubicación geográfica de las empresas participantes en el estudio.
- **Conocimiento y Percepción:** A través de preguntas específicas, se indagó sobre el nivel de conocimiento y percepción de las empresas en relación con la gestión ambiental y energética. Se exploraron aspectos como la familiaridad con prácticas sostenibles y la disposición a adoptarlas.
- **Políticas y Sistemas de Gestión:** Mediante esta sección, se buscó evaluar la existencia y efectividad de políticas y sistemas formales de gestión ambiental y energética en las organizaciones.
- **Roles y Responsabilidades:** Las preguntas de esta sección apuntan a identificar si las empresas cuentan con personal dedicado exclusivamente a la gestión ambiental y energética, así como a comprender cómo se distribuyen las responsabilidades en estos ámbitos.
- **Acciones Implementadas en los Últimos 4 Años:** Se recopilaron datos sobre las acciones concretas de gestión ambiental y energética que las empresas han implementado en los últimos cuatro años. La elección de este período permite capturar un rango significativo de tiempo para evaluar iniciativas y cambios en prácticas sostenibles.
- **Resultados y Desempeño:** Las respuestas proporcionadas permitieron evaluar la existencia de indicadores y metas relacionados con la gestión ambiental y energética, así como medir el impacto y el éxito de las acciones implementadas.

El análisis de los datos recopilados se llevó a cabo a través de la utilización de herramientas estadísticas y de visualización, con el fin de identificar patrones y tendencias. Sperandei S (2014). Se utilizan cálculos de porcentajes y promedios para resumir las respuestas a cada pregunta, lo que permite obtener una visión general de las prácticas de gestión ambiental y energética en la CMR. Además, se emplearon gráficos y tablas para representar visualmente los resultados y facilitar su comprensión.

DESCRIPCIÓN DE LAS ORGANIZACIONES

En el análisis de la diversidad de actividad económica de las organizaciones se revela una amplia gama de sectores económicos. Como se puede observar en la Figura 1, representa la distribución porcentual de las actividades económicas, se destaca una heterogeneidad significativa en la composición de las organizaciones. Estos abarcan desde la industria manufacturera hasta los servicios, se especula así una visión de la economía de la región de la CMR.

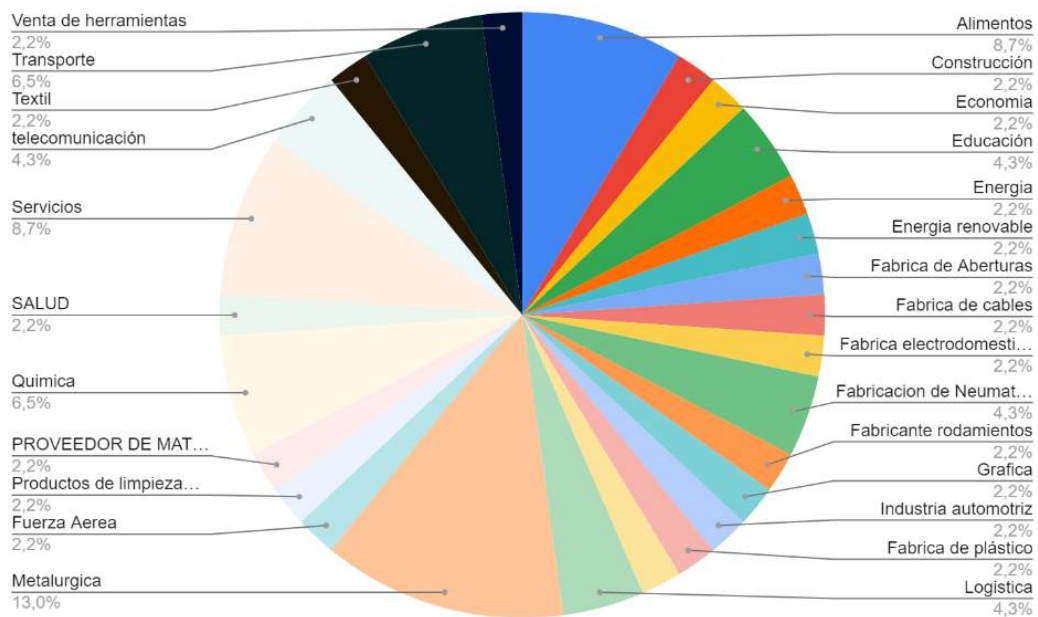


Figura 1: Actividad económica de las Organizaciones Participantes. Fuente Elaboración propia.

Los establecimientos encuestados para este estudio están ubicados en diversas localidades dentro de la CMR. Esta extensa área geográfica abarca desde zonas urbanas densamente pobladas, hasta áreas suburbanas y rurales. La diversidad geográfica es un aspecto destacado, y es posible apreciarlo en la Figura 2 y 3, el cual resalta las distintas localidades donde se ubican las organizaciones participantes. A su vez, se han sumado dos respuestas de organizaciones que no pertenecen al CMR, que corresponden a municipio de San Isidro y de Quilmes. Se han tenido en cuenta ya que pertenecen a la periferia de la Cuenca.

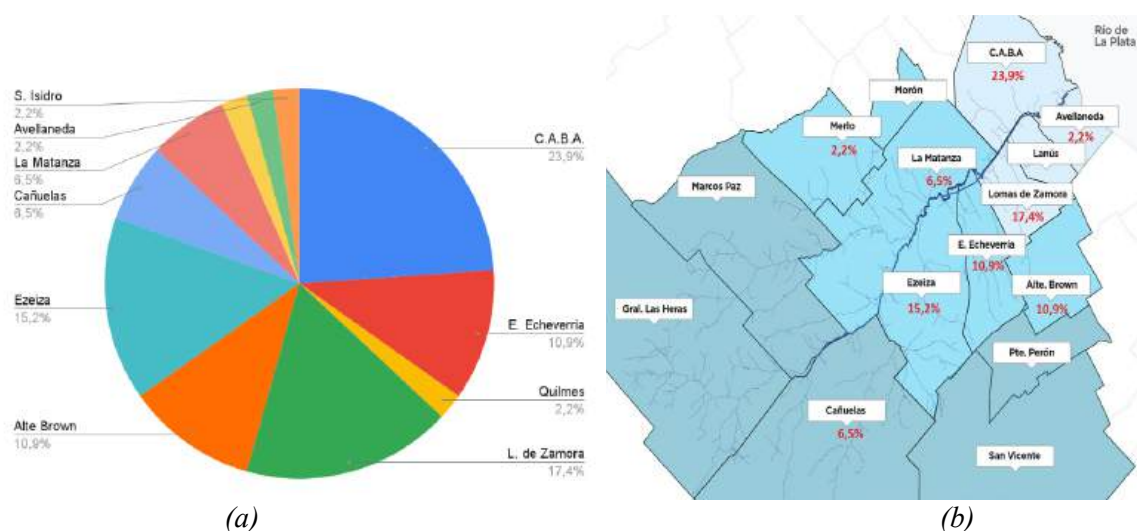


Figura 2: (a) Porcentajes por partidos perteneciente a la CMR que participaron de la encuesta. (b) Ubicación geográfica en la CMR de los participantes de la encuesta. Fuente Elaboración propia.

Un atributo distintivo de los participantes en este análisis es la heterogeneidad observable en sus niveles de conocimiento en las disciplinas de gestión ambiental y energética. Esta característica se refleja de manera concreta en las respuestas donde se evalúa la comprensión de conceptos esenciales y la familiaridad con las prácticas vinculadas a la gestión sustentable. La distribución en la Figura 3 abarca desde aquellos participantes que muestran un entendimiento sólido hasta aquellos cuyo conocimiento es más limitado en los campos de la gestión energética y ambiental. Esta diversidad en los niveles de conocimiento infunde un enriquecimiento sustancial en el estudio, y así promueve el análisis de las variaciones en percepciones y enfoques en función de la profundidad del entendimiento de los participantes.

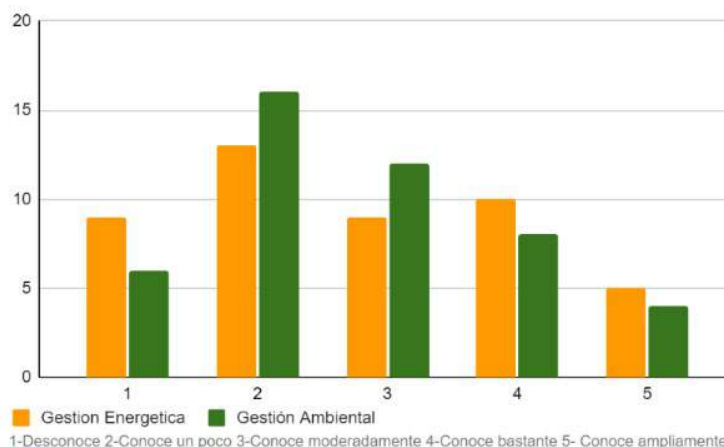


Figura 3: Nivel de Conocimiento de la temática de los Participantes. Fuente Elaboración propia.

Otro aspecto crucial de la composición de las organizaciones en este estudio es la variabilidad en el tamaño de las organizaciones en las que operan. Los resultados revelan una distribución que abarca un espectro diverso de tamaños organizativos (Figura 4). Esta diversidad en el tamaño de las organizaciones contribuye a enriquecer la comprensión de cómo las prácticas de gestión energética y ambiental se manifiestan en una variedad de contextos organizativos. Además, ofrece una visión más completa de cómo diferentes magnitudes organizativas pueden influir en la adopción y la implementación de prácticas sostenibles. El análisis de esta variabilidad proporciona una visión integral de la dinámica de gestión en la región de la CMR, permiten considerar las implicaciones específicas de tamaño en el ámbito de la sostenibilidad y la gestión medioambiental.

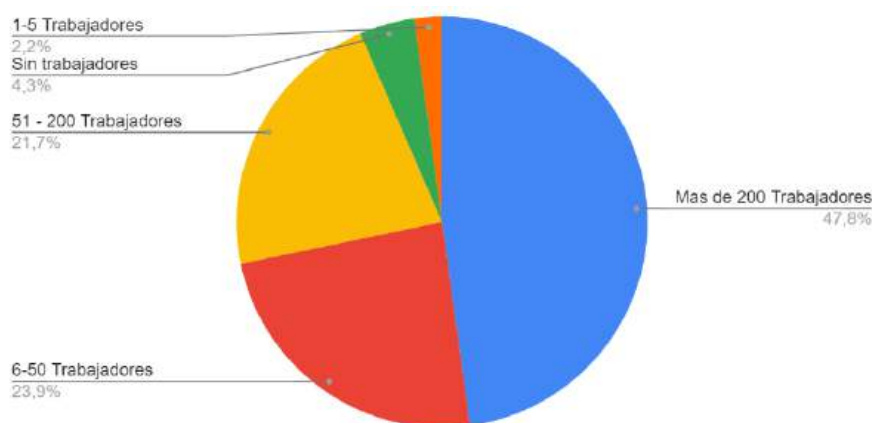


Figura 4: Tamaño por cantidad de trabajadores de las Organizaciones. Fuente Elaboración propia.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS POR PREGUNTA.

En esta sección, se realiza un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos a través del CGAETe. Estos resultados proporcionan una visión detallada de las prácticas de gestión energética y ambiental en las organizaciones de la CMR. Se exploran las tendencias, patrones y enfoques adoptados por las organizaciones en sus esfuerzos por promover la sostenibilidad y reducir su impacto ambiental. Los datos recopilados permiten una comprensión más profunda de las prácticas actuales y sirven como base para identificar áreas de mejora y oportunidades para avanzar hacia una gestión más eficiente y sostenible en la región. Para el análisis se agrupan las preguntas de Gestión Energética y Ambiental que tratan de la misma temática.

Pregunta 1: Existe alguna área dentro de su empresa desarrolla los temas Gestión Energética o Gestión Ambiental

La pregunta en análisis brinda información sobre la estructura organizativa y el nivel de compromiso de las empresas con la gestión sostenible en la región de la CMR. En la Figura 5 se observan patrones de suma relevancia, por ejemplo: un aspecto significativo, un 43% de los encuestados expresó desconocer si sus empresas cuentan con un departamento o área específicamente destinada a la gestión ambiental. Esta falta de claridad en ciertos participantes indica posiblemente una necesidad de mejorar la comunicación interna y sensibilización respecto a la importancia de la gestión ambiental en las estructuras organizativas. Por otro lado, se destaca que un 22% de los encuestados afirmó que sus empresas sí tienen un área dedicada a la gestión ambiental. Este hallazgo revela un compromiso tangible de un segmento relevante de las organizaciones hacia la adopción de medidas concretas para abordar cuestiones ambientales. La existencia de áreas especializadas en gestión ambiental sugiere que estas empresas adoptan un enfoque proactivo para cumplir con los requisitos normativos y para implementar prácticas sostenibles en sus operaciones.

En lo que respecta a la gestión energética, se observa un patrón similar al anterior. Un 32% de los encuestados manifestó no tener conocimiento sobre la existencia de áreas internas dedicadas a la gestión energética en sus empresas. Esta situación, paralela al desconocimiento en gestión ambiental, señala que un grupo significativo de participantes podría beneficiarse de una mayor claridad en cuanto a las estructuras organizativas y actividades relacionadas con la gestión energética. Del mismo modo, un 15% de los encuestados indicó que en sus empresas sí existe un área dedicada a la gestión energética. Este resultado paralelo a la gestión ambiental sugiere que hay una parte de las organizaciones que toma medidas específicas para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo. Por último, un 13% de los encuestados afirmó que en sus empresas no hay un área interna para la gestión ambiental, mientras que un 9% indicó lo mismo en relación a la gestión energética.

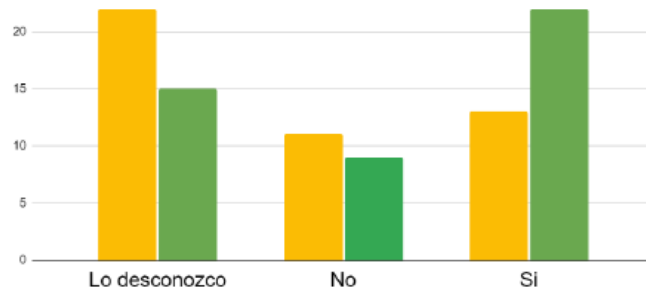


Figura 5: Existe en la empresa alguna área dentro de su empresa desarrolla los temas Gestión Energética (amarillo) o Gestión Ambiental (verde). Fuente Elaboración propia.

Pregunta 2: En su empresa quien desarrolla los siguiente temas Gestión Energética o Gestión Ambiental

El análisis de las respuestas a la Pregunta 2, brinda una perspectiva más precisa sobre cómo se distribuyen las responsabilidades en cuanto a la Gestión Energética y la Gestión Ambiental en las empresas participantes. En la Figura 6 se observa un resumen grafico de las respuestas.

En el ámbito de la Gestión Energética, se observa una distribución diversa de responsabilidades entre las diferentes áreas de la organización. Se constata que varias gerencias están involucradas en la implementación de estas prácticas. Un 7% de las respuestas indican que la tarea recae en la Gerencia de Energía. Además, se identifica que otras áreas, como la Gerencia de Mantenimiento (24%), la Gerencia de Sustentabilidad/Medio Ambiente (12%), la Gerencia de Producción (3%), y "Otra Área" (8%) también desempeñan roles en la Gestión Energética. Sin embargo, un porcentaje importante de empresas, el 43% de los encuestados, menciona que ninguna área específica se encarga de la Gestión Energética. Además, un 1% de las organizaciones opta por tercerizar la gestión energética.

En lo que respecta a la Gestión Ambiental, se observan tendencias similares en la asignación de responsabilidades. La Gerencia de Sustentabilidad/Medio Ambiente se posiciona como la principal encargada de liderar estas actividades en la mayoría de las empresas un 38% de las respuestas. Esto refleja un compromiso específico con la gestión de aspectos ambientales. Además, algunas empresas asignan la responsabilidad a la Gerencia de Calidad (7%) y la Gerencia de Mantenimiento (9%), lo cual sugiere una distribución diversificada de tareas. Sin embargo, un 29% de las empresas indicó que ninguna área específica se ocupa de la Gestión Ambiental, y un 20% pertenece a "Otra Área".

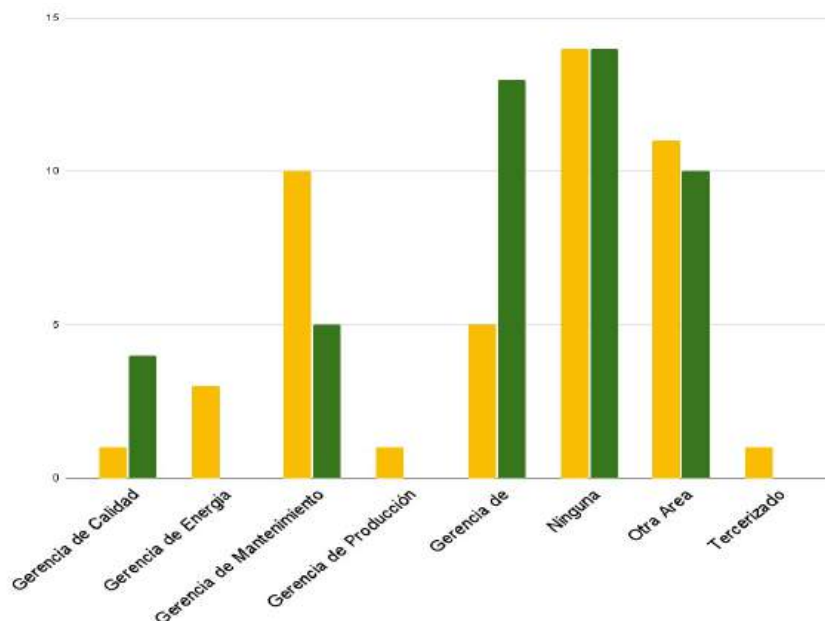


Figura 6: En su empresa quien desarrolla los siguiente temas Gestión Energética (amarillo) o Gestión Ambiental(verde). Fuente Elaboración propia.

Pregunta 3: Su empresa cuenta con un sistema de Gestión Energética o Gestión Ambiental

El análisis de esta pregunta refiere a la existencia de un sistema de gestión en las empresas participantes brinda información sobre la adopción y formalización de prácticas de gestión sostenible, tanto en el ámbito Energético como en el Ambiental. (Figura 7)

En primer lugar, se analiza la Gestión Energética y logra observarse que un 45% de los encuestados menciona desconocer si su empresa cuenta con un sistema de gestión. Esto puede sugerir que algunas organizaciones carecen de información sobre la implementación de estructuras formales para la gestión de energía. Por otro lado, un 15% de los encuestados indicó que su empresa no cuenta con un sistema de gestión energética, lo cual podría indicar una oportunidad de mejora en términos de formalizar y estructurar las prácticas relacionadas con la eficiencia energética. Sin embargo, es positivo observar que un 26% de las respuestas afirmó que sus empresas sí cuentan con un sistema de gestión energética, lo que indica un compromiso con la implementación de políticas y procesos destinados a la mejora continua en el uso de la energía.

En lo que respecta a la Gestión Ambiental, los resultados son similares. Un 38% de los encuestados menciona desconocer si su empresa posee un sistema de gestión ambiental. Esto puede ser una señal de que algunas organizaciones carecen de información sobre la formalización de prácticas ambientales. Por otra parte, un 15% afirmó que su empresa no cuenta con un sistema de gestión ambiental, lo que sugiere un área en la que estas empresas podrían avanzar para implementar estructuras formales de gestión ambiental. Es alentador ver que un 39% de los participantes señala que sus empresas sí cuentan con un sistema de gestión ambiental, lo que implica un enfoque consciente en el establecimiento de políticas y procedimientos que abordan aspectos relacionados con el medio ambiente.

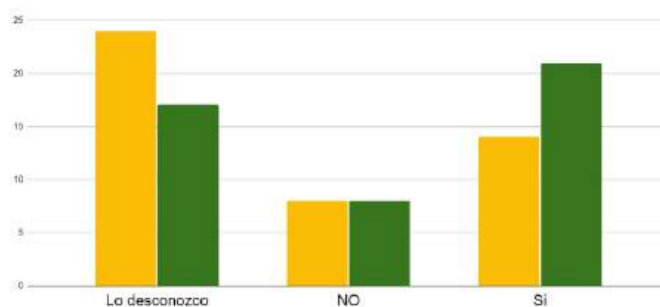


Figura 7: Su empresa cuenta con un sistema de Gestión Energética (amarillo) o Gestión Ambiental(verde). Fuente Elaboración propia.

Pregunta 4: Su empresa tiene políticas de Gestión Energética o Gestión Ambiental

En el análisis que se observa en la figura 8, se indaga sobre la presencia de políticas de Gestión Energética y Gestión Ambiental en las empresas participantes, proporciona información crucial sobre el enfoque y compromiso de las organizaciones hacia la sostenibilidad y la gestión de recursos.

En lo que respecta a la Gestión Energética, el 49% de los encuestados señaló desconocer si sus empresas tienen políticas establecidas en esta área. Esto puede indicar una falta de claridad o comunicación interna sobre la existencia de políticas que regulen la gestión eficiente de la energía. Sin embargo, el 34% afirmó que sus empresas cuentan con políticas de Gestión Energética. Esta cifra sugiere que un segmento significativo de las organizaciones que adoptan una postura proactiva hacia la gestión de la energía y está tomando medidas para implementar prácticas sostenibles en sus operaciones. Por otro lado, un 17% indicó que sus empresas no cuentan con políticas de Gestión Energética, lo que puede representar una oportunidad de mejora para implementar directrices que promuevan la eficiencia energética y la reducción del consumo.

En cuanto a la Gestión Ambiental, se observan tendencias similares. Un 36% de los encuestados mencionó desconocer si sus empresas tienen políticas en esta área. Esto podría indicar la necesidad de una mayor transparencia y comunicación sobre las políticas ambientales existentes en estas organizaciones. Un 43% de los participantes afirmó que sus empresas sí tienen políticas de Gestión Ambiental. Esta cifra refleja un enfoque consciente hacia la gestión de aspectos ambientales y sugiere

que un porcentaje considerable de las organizaciones está comprometido con prácticas sostenibles. Por último, un 21% indicó que sus empresas no tienen políticas de Gestión Ambiental.

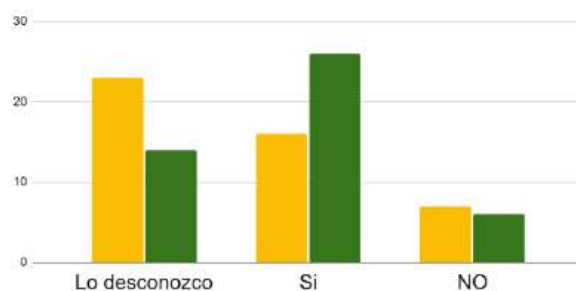


Figura 8: Su empresa tiene políticas de Gestión Energética (amarillo) o Gestión Ambiental(verde). Fuente Elaboración propia.

Pregunta 5: Su empresa cuenta con un encargado exclusivo en temas de Gestión Energética o Gestión Ambiental

La quinta pregunta aborda la existencia de un encargado exclusivo para la Gestión Energética y la Gestión Ambiental dentro de las empresas participantes, lo cual proporciona una visión sobre el nivel de dedicación y enfoque hacia la sostenibilidad en sus operaciones. (Figura 9).

En relación a la Gestión Energética, un 46% de los encuestados indicó desconocer si sus empresas cuentan con un encargado exclusivo para este tema. Esta falta de conocimiento puede sugerir que algunas organizaciones no están bien informadas sobre la existencia de roles específicos para la gestión de la energía. Por otro lado, un 28% afirmó que sus empresas no tienen un encargado exclusivo en Gestión Energética. Esto podría indicar que en un porcentaje significativo de las organizaciones no se ha asignado una posición específica para liderar los esfuerzos relacionados con la eficiencia energética y la reducción del consumo. No obstante, un alentador 26% mencionó que sí cuentan con un encargado exclusivo en temas de Gestión Energética. Esto sugiere que algunas empresas encaran un enfoque proactivo y específico para dirigir sus esfuerzos hacia prácticas energéticas sostenibles.

En lo que respecta a la Gestión Ambiental, un 40% de los participantes manifestó desconocer si sus empresas tienen un encargado exclusivo en este ámbito. Esto puede reflejar una falta de comunicación interna sobre la existencia de roles dedicados a la gestión ambiental. Por otro lado, un 28% mencionó que no cuentan con un encargado exclusivo en temas de Gestión Ambiental. Esto puede sugerir que en una proporción considerable de las organizaciones no se ha establecido una posición específica para liderar los esfuerzos en la dirección de prácticas ambientales responsables. Sin embargo, un 32% señaló que sí cuentan con un encargado exclusivo en temas de Gestión Ambiental. Esto demuestra que una parte importante de las empresas está teniendo en cuenta las medidas concretas para abordar los aspectos ambientales en sus operaciones.

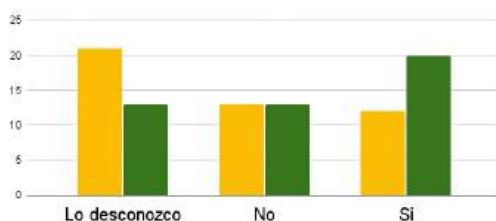


Figura 9: Su empresa cuenta con un encargado exclusivo en temas de Gestión Energética (amarillo) o Gestión Ambiental(verde). Fuente Elaboración propia.

Pregunta 6: Su empresa tiene indicadores y/o metas asociadas a Gestión Energética o Gestión Ambiental

Los análisis de estas respuestas arrojan una perspectiva esclarecedora sobre el grado de seguimiento y compromiso de las empresas participantes en la CMR con respecto a sus prácticas sostenibles. (Figura 10).

En el ámbito de la Gestión Energética, se observa que un 32% de los encuestados indicó desconocer si sus empresas cuentan con indicadores o metas asociadas. Esto podría ser indicativo de una falta de transparencia en cuanto a la medición del desempeño energético o una posible falta de seguimiento. Sin embargo, es positivo observar que un 30% de las organizaciones sí han implementado indicadores y/o metas para medir su eficiencia energética. Este enfoque es fundamental para evaluar y mejorar constantemente el uso de la energía en las operaciones, lo que puede resultar en ahorros significativos y una menor huella ambiental.

En lo que respecta a la Gestión Ambiental, un 37% de los encuestados manifestó desconocimiento sobre la existencia de indicadores o metas asociadas en sus empresas. A pesar de esto, es alentador observar que un 38% de las organizaciones sí ha implementado estos indicadores o metas para medir su desempeño ambiental. Estos resultados sugieren que una parte importante de las empresas participantes poseen enfoques medibles y concretos para evaluar su impacto en el medio ambiente y establecer metas que guíen su mejora continua.

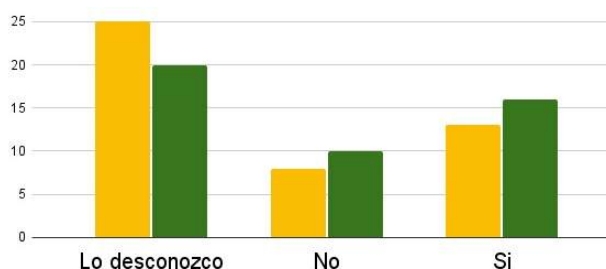


Figura 10: Su empresa tiene indicadores y/o metas asociadas a Gestión Energética(amarillo) o Gestión Ambiental(verde). Fuente Elaboración propia.

Pregunta 7: Que acciones de Gestión energética/ambiental se han llevado a cabo en su empresa en los últimos 4 años

La Pregunta 7, proporciona un panorama detallado de las iniciativas implementadas para promover la sostenibilidad en la región de la CMR. El análisis de las respuestas revela una variedad de acciones emprendidas por las empresas encuestadas para abordar aspectos energéticos y ambientales. Entre las acciones más mencionadas se encuentran la "Implementación de proyecto de gestión de residuos" y la "Implementación de proyecto de gestión de efluentes".

Estas iniciativas reflejan un compromiso activo por parte de las organizaciones para gestionar y reducir sus impactos ambientales, centrándose en la correcta disposición de residuos y la gestión eficiente de efluentes, lo cual es fundamental para preservar la calidad del entorno. Otra acción relevante es la "Campaña de concientización a trabajadores de uso eficiente de la energía". Esta iniciativa demuestra un enfoque proactivo en la sensibilización y educación de los empleados para promover prácticas más sostenibles en el uso de la energía, lo que puede contribuir significativamente a la reducción de consumos. Además, algunas empresas han implementado medidas concretas para aumentar la eficiencia energética, como la "Instalación de Energías renovables en el predio" y la "Implementación de proyectos de eficiencia energética".

En la Figura 11 se observa un estudio realizado con las respuestas en formato de nube de palabra, el cual facilita identificar de manera más fácil y proporcional las acciones implementadas por las empresas. Es alentador observar que un porcentaje de empresas ha implementado un "Sistema de gestión ambiental ISO 14001". Esto indica que estas organizaciones han optado por adoptar un enfoque estructurado y certificado para abordar los desafíos ambientales y mejorar continuamente sus prácticas. Por otro lado, es relevante mencionar que un grupo de empresas respondió "Ninguna" a la pregunta sobre acciones de gestión energética/ambiental en los últimos 4 años.



Figura 11: Análisis de los Resultados de la pregunta 7: *Que acciones de Gestión energética/ambiental se han llevado a cabo en su empresa en los últimos 4 años.* Fuente *Elaboración propia.*

Pregunta Numero 8: A través de que medio se ha informado sobre temas de Gestión Energética o Gestión Ambiental para las empresas

La pregunta indaga sobre los medios a través de los cuales las empresas se han informado acerca de temas relacionados con la gestión energética y ambiental arroja valiosas perspectivas sobre las fuentes de información preferidas por las organizaciones en la CMR. Esta información es fundamental para entender cómo las empresas se mantienen actualizadas y cómo acceden al conocimiento necesario para desarrollar prácticas sostenibles en sus operaciones.

Tras examinar las respuestas y llevar a cabo un estudio de nube de palabras, se puede observar que los términos más frecuentes que emergen son "Internet", "Capacitaciones Internas" y "Información de Universidades". Estos resultados revelan una tendencia clara hacia la utilización de plataformas digitales y educativas como principales medios de adquisición de información en gestión energética y ambiental. La prevalencia de "Internet" sugiere que las empresas recurren a la web para acceder a una amplia variedad de recursos, desde artículos y noticias hasta herramientas y guías específicas sobre sostenibilidad. La alta presencia de "Capacitaciones Internas" indica que muchas empresas están invirtiendo en el desarrollo de su personal interno a través de programas de formación y entrenamiento en temas relacionados con la gestión energética y ambiental. Esto es un signo positivo de un compromiso genuino por parte de las empresas para mejorar su comprensión y prácticas en estas áreas. Por otro lado, la mención frecuente de "Información de universidades" sugiere que las organizaciones están buscando fuentes de conocimiento más formales y académicas para abordar estas cuestiones. Esto refleja un enfoque más estructurado en la adquisición de conocimiento y la aplicación de prácticas basadas en la investigación. La combinación de estos medios de información, junto con otros como "TV" y "Prensa escrita", indica que las empresas utilizan en menor medida una variedad de estos recursos para mantenerse informadas. Esta diversidad de fuentes de información sugiere un enfoque integral en la búsqueda de conocimiento, donde las organizaciones buscan estar al tanto de los desarrollos y mejores prácticas en múltiples plataformas.

La Figura 12, generada a partir del análisis de nube de palabras, ilustra visualmente las palabras más frecuentes mencionadas por los encuestados en relación con los medios de información utilizados. Esta figura proporciona una imagen clara de las preferencias de información de las empresas en la CMR, que resaltan la importancia de las plataformas digitales, la formación interna y la colaboración con instituciones académicas en su búsqueda por la gestión energética y ambiental eficaz.



Figura 12: Nube de palabras de medios de información preferidos por las empresas en gestión energética y ambiental. Fuente Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El presente estudio ha contribuido a la comprensión de las prácticas de gestión ambiental y energética en las empresas ubicadas en la CMR. A través de un análisis detallado de las respuestas recopiladas en el CGAETe, se han identificado patrones y tendencias que reflejan la diversidad y complejidad de la región, así como los esfuerzos y desafíos que enfrentan las organizaciones en su búsqueda de sostenibilidad.

Los resultados han revelado una amplia gama de sectores económicos representados entre los participantes, que van desde la industria manufacturera hasta los servicios. Esta diversidad económica refleja la complejidad de la CMR y enriquece el análisis de las prácticas de gestión. Además, la variabilidad geográfica de las empresas, que abarca desde zonas urbanas densamente pobladas hasta áreas suburbanas y rurales, resalta la importancia de considerar las dinámicas locales en la toma de decisiones ambientales y energéticas.

En cuanto a la asignación de responsabilidades en la gestión energética y ambiental, se observa una variabilidad significativa. A pesar de que un 54% de los encuestados indicó desconocer si existe un área específica para estas gestiones, se identificó la presencia de gerencias y departamentos dedicados a estas responsabilidades en un 46% de las organizaciones. Estos hallazgos sugieren oportunidades para mejorar la comunicación interna y la claridad en la estructura organizativa en relación con la sostenibilidad.

Respecto a las acciones implementadas en los últimos 4 años, se evidencia una combinación de enfoques, desde la gestión de residuos y efluentes hasta la concienciación y la implementación de energías renovables. La adopción de medidas de eficiencia energética (72%) y la implementación de sistemas de gestión ambiental ISO 14001 (28%) destacan el compromiso de algunas empresas por avanzar hacia prácticas más sostenibles. Sin embargo, el hecho de que un 22% de las organizaciones no haya implementado acciones en estos ámbitos señala la necesidad de una mayor adopción de prácticas sostenibles.

Un análisis de nube de palabras de los medios de información preferidos destaca la importancia de plataformas digitales, como "Internet," que fue mencionada en un 66% de las respuestas, así como "Capacitaciones Internas" (34%) y "Información de Universidades" (30%). Estos resultados revelan una clara tendencia hacia la utilización de recursos educativos y fuentes de conocimiento académico para el desarrollo de prácticas en gestión energética y ambiental.

En línea con estos hallazgos, se ha planificado continuar el relevamiento, para sumar más organizaciones para analizar la complejidad energética de las empresas en la región. A partir del estudio realizado, los futuros pasos incluirán la evaluación y desarrollo de políticas públicas que se adapten a las necesidades

del territorio, busca promover la adopción de prácticas sostenibles y la colaboración entre sectores para impulsar un enfoque integral hacia la gestión energética y ambiental.

LINEAS FUTURAS

El CGAETe se estructuró en dos partes fundamentales. La primera parte se enfocó en evaluar lo demostrado en este informe, el nivel de conocimiento y la percepción de los participantes en relación con la gestión energética y ambiental en la CMR. La segunda parte, en particular, apuntó a analizar la complejidad energética en las organizaciones, estudio del tipo de fuente de energía utilizada, Usos significativos y cantidad de energía utilizada. Sin embargo, se observó que aproximadamente la mitad de los encuestados respondieron solamente a esta segunda parte del cuestionario. Con el objetivo de obtener un análisis más completo y representativo de la gestión sostenible en la región, se continuará con la incorporación de organizaciones al relevamiento, lo que permitirá ampliar y mejorar la muestra.

A partir del detallado estudio realizado hasta ahora, se plantean importantes líneas futuras de investigación y acción. El enfoque se dirigirá hacia la comprensión y el diseño de políticas públicas que se adapten a las necesidades específicas del territorio de la CMR. Estas políticas deben considerar tanto las características únicas de la región como los desafíos ambientales y energéticos presentes en las organizaciones que la conforman. A través de la colaboración entre los sectores público y privado, así como la sociedad en su conjunto, se podrán establecer estrategias eficaces que impulsen la adopción de prácticas sostenibles y contribuyan al mejoramiento del entorno y la calidad de vida de sus habitantes.

Esta iniciativa no solo contribuirá a la mejora de la gestión ambiental y energética en la CMR, sino que también servirá como modelo y referencia para otras regiones que enfrentan desafíos similares. La investigación y la implementación de políticas adaptadas a las particularidades locales son esenciales para abordar de manera efectiva los problemas ambientales y energéticos, propone y promueve un desarrollo sostenible que beneficie a todos los actores involucrados.

REFERENCIAS

- Morris J. (2022) Relevamiento de gestión energética ambiental en la industria: validación de la herramienta de recolección de datos AÑO 10 - VOLUMEN 19 | MAYO DE 2022 | ISSN 2314-0925
- Corte Suprema de Justicia de la Nación (2008), “Mendoza, Beatriz Silvia y otros c/ Estado Nacional y otros s/ daños y perjuicios (daños derivados de la contaminación ambiental del Río Matanza-Riachuelo)”, 8 de julio, Buenos Aires, Corte Suprema de Justicia de la Nación,
- Zabaloy, M. F. (2020). Eficiencia energética. Un estudio del marco habilitante en la Argentina. *Redes. Revista De Estudios Sociales De La Ciencia Y La Tecnología*, 25(48), 133–170. Recuperado a partir de: <https://revistaredes.unq.edu.ar/index.php/redes/article/view/64>
- ONU (2015). Resolución 70/1, “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” Asamblea General, Nueva York.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en el nuevo contexto mundial y regional: escenarios y proyecciones en la presente crisis (LC/PUB.2020/5)*, Santiago, 2020.
- GFA Consulting Group (2021). Informe final, propuesta del plan nacional de eficiencia energética, Proyecto de Cooperación UE-Arg. “Eficiencia energética en Argentina”. 38-56
- Balance Energético Nacional, Argentina [Citado el 10/09/2021] Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>
- Blacksmith Institute & Green Cross Switzerland. *The Worlds Worst 2013: The Top Ten Toxic Threats*. Zurich, 2013. [Citado el 10/09/2021]. Recuperado de: <https://www.worstpolluted.org/docs/TopTenThreats2013.pdf>.
- Pasqualini MF, Faure Montania E, Hepp Y, Antolini L, Finkelstein JZ, García SI. Mapa de riesgo sanitario ambiental de la Cuenca Matanza Riachuelo (Argentina). Una metodología para priorizar intervenciones. *Rev. Salud Ambiental*. 2019; 19(2):148-158.
- Establecimientos empadronados y agentes contaminantes en la Cuenca Matanza Riachuelo. [Citado el 10/09/2021] Disponible en: <http://datos.acumar.gob.ar/> Revisión 10/09/21
- Sperandei S. The pits and falls of graphical presentation. *Biochem Med (Zagreb)*. 2014;24(3):311-320. doi: 10.11613/BM.2014.033

Cortina, J. M. (1993). What is the coefficient alpha? An examination of theory and applications. *Journal of Applied Psychology*, 78(1), 98.

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334

PATH TOWARDS BUSINESS SUSTAINABILITY: AN INTEGRAL ANALYSIS OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN COMPANIES OF THE CUENCA MATANZA RIACHUELO

ABSTRACT: In a context where sustainability and efficiency become business imperatives, this study delves into the Matanza Riachuelo Basin (CMR) to analyze energy and environmental management strategies in 46 local companies. The objective is to evaluate the execution and results of these practices in terms of performance and sustainability. Using a specific instrument, the Territorial Environmental-Energy Management Questionnaire of the UNLZ Faculty of Engineering (CGAETe), a set of data was collected that covers aspects such as the business profile, size, operational areas, knowledge, preferred information channels, units specialized internal procedures, corporate policies, management systems and responsible roles in this area. The results indicate disparities in the adoption and understanding of sustainable practices, with divergences in the perception of energy and environmental management. The main sources of information are online platforms, educational institutions and internal training. The existence of corporate units and policies emerges as the key to effective execution. The influence of management systems and exclusive managers is identified. The analysis calls for a comprehensive and sustainable approach, highlighting the importance of strengthening policies, systems and education. The study provides clarity on regional dynamics and guidance to advance in energy and environmental management, in line with the demands of industrial sustainability.

Keywords: Business sustainability, Energy management, Environmental management, Cuenca Matanza Riachuelo, Sustainable practices

ANÁLISIS EPDA EN VIVIENDAS DE BAJA DENSIDAD CONSTRUIDAS EN LA CIUDAD DE CONCEPCIÓN EN EL PERIODO 2018 A 2019

David Elsinger^{1,2}, Beatriz S. Garzón^{1,2}

¹ Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT)

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

RESUMEN: El presente trabajo tiene por objetivo analizar las estrategias pasivas de diseño arquitectónico (EPDA) utilizadas en una muestra de 23 viviendas de baja densidad de producción privada extraída de la ciudad de Concepción, Tucumán, Argentina. Las viviendas responden a los expedientes municipales de obra privada aprobados por el municipio de la ciudad. El análisis EPDA, establecido en la Modificación N°1 norma IRAM 11900, es una valoración del diseño de la vivienda frente a las condiciones climáticas de cada región. Se lleva a cabo en este trabajo por medio del calculador C-EBioDA que permite obtener para cada vivienda un porcentaje de aplicación de las EPDA. Los resultados abarcan las similitudes, tanto de los recursos arquitectónicos-constructivos (RAC) como de las estrategias de diseño utilizadas en las 23 viviendas, y las diferencias de las valoraciones EPDA.

Palabras clave: arquitectura sustentable, arquitectura bioclimática, práctica constructiva

INTRODUCCIÓN

A partir de la crisis energética la arquitectura bioclimática se posiciona como una de las herramientas con la cual trabajar desde el sector edilicio (Castaño Duque y Osorio Valencia, 2013). El conocimiento de estrategias pasivas de diseño arquitectónico, tanto para el saneamiento de edificios existentes como para nuevos proyectos, permite un uso efectivo y necesario de las mismas, las cuales posicionan al sector edilicio dentro del cambio de paradigma ambiental en reducción de emisiones a la atmósfera (Arballo, et al, 2022).

Las estrategias pasivas de diseño arquitectónico (EPDA) se enuncian en la Modificación N°1 a la norma IRAM 11900 (2019) y se definen como: “Características del diseño arquitectónico y de los elementos constructivos que adecuan el edificio a las condiciones climáticas y ambientales, y permiten mejorar la sensación de confort higrotérmico y reducir la demanda de energía convencional” (IRAM, 2019, p. 2). Las estrategias que se evalúan según la norma IRAM son: aislación térmica; inercia térmica; protección solar; ventilación natural; captación solar; humidificación; y entorno. A partir de la evaluación se realiza una ponderación de dichas estrategias que depende del clima donde se emplaza el edificio en estudio.

El presente trabajo forma parte de los avances realizados en el proyecto de Tesis del primer autor, titulado “Eficiencia energética y confort térmico en viviendas de producción actual en la ciudad de Concepción-Tucumán: problemas recurrentes y posibles soluciones” inscripto en el Doctorado de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT). El objetivo de esta investigación es analizar las EPDA utilizadas en viviendas de baja densidad y de producción privada que se construyen en la actualidad en la ciudad de Concepción, Tucumán. Para cumplir con tal objetivo se analizan todas las viviendas del periodo 2018 y 2019 con permiso de construcción otorgado por el municipio en donde se emplazan.

METODOLOGÍA

Para realizar esta investigación se utiliza una metodología cuantitativa separada en dos etapas: la conformación de una muestra de viviendas y el análisis EPDA de la muestra llevado a cabo por el calculador C-EBioDA (Fernández y Garzón, 2019).

Primera etapa

Se toma como muestra los expedientes municipales de la Dirección de Planeamiento Urbano de la ciudad de Concepción. Los mismos abarcan las siguientes clases de obra: “obra nueva”, “ampliación”, “conforme a obra” y todas sus combinaciones posibles, correspondientes a los años 2018 y 2019. En todos los casos, sólo se tienen en cuenta los expedientes con destino de: vivienda unifamiliar, vivienda colectiva de baja densidad y combinaciones de vivienda unifamiliar, por ejemplo, una vivienda con un local comercial. El corte temporal realizado inicia en el año 2016 debido a la puesta en vigencia de una nueva política de inspección municipal y culmina en el último año completo al cual se tiene acceso en el proyecto de tesis mencionado.

En este trabajo, se presentan los avances de los periodos 2018 y 2019. A partir de la sistematización de los expedientes municipales, se conforma un corte de la muestra correspondiente a las carpetas de “obra nueva” y las carpetas de “conforme a obra” recategorizadas a “obra nueva” (obras construidas recientemente, pero presentadas en el municipio como una obra construida), compuesto por las 23 viviendas analizadas en este trabajo. A partir de la información disponible (información catastral, planos de arquitectura, planos de estructura y memorias descriptivas) se analizan en las viviendas las siguientes variables: orientación del terreno (ORI); superficie del terreno (m²) y clasificación en grupos; superficie de la vivienda (m²) y clasificación en grupos; cantidad de niveles/plantas en los que se desarrolla la vivienda (N); tipo de techo (liviano, mixto o pesado); tipo de cerramiento vertical exterior (CVE liviano o pesado) y espesor del CVE (cm).

Segunda etapa

Se implementa el cálculo EPDA en las 23 viviendas en análisis a través del calculador C-EBioDA. El cálculo permite identificar una serie de parámetros característicos denominados recursos arquitectónico-constructivos (RAC) entre los que se identifican: la aislación térmica, la inercia térmica, la protección solar, la ventilación natural, la captación solar, la humidificación y el entorno. Se considera que los RAC reducen la demanda de energía y optimizan el confort higrotérmico por medio del acondicionamiento natural de la edificación en los periodos de verano e invierno. Cada RAC reviste una relevancia diferente en función de la caracterización climática de la zona analizada y la interacción entre los diferentes parámetros.

Los RAC considerados son: aislación térmica del techo, aislación térmica de muros exteriores, aislación térmica de ventanas, aislación térmica del piso, inercia térmica del techo, inercia térmica de muros exteriores, inercia térmica del piso, color externo del techo, color externo de muros, sombreado de ventanas, sistemas solares pasivos directos, sistemas solares pasivos indirectos, altura piso-techo, contacto con otras viviendas, obstáculos exteriores, sol verano, forma compacta, proporción de ventana en muros, ventilación cruzada, ventilación selectiva, suelo exterior vegetación, obstáculos contra viento, superficie ventana en techo y nivel de hermeticidad.

El Grupo Hábitat Sustentable y Saludable (GHabSS) de la FAU-UNT crea el calculador C-EBioDA (Fernández y Garzón, 2019), para simplificar y sistematizar la obtención de la ponderación EPDA. Este lleva a cabo una sistematización, a través de una planilla de cálculo, de todas las variables cualitativas con sus correspondientes valores que inciden en la ponderación EPDA. Para su ejecución, las únicas variables a seleccionar son las calidades de los elementos constructivos para cada RAC. Gracias a este proceso se obtiene como resultado el puntaje de dicho recurso. Las ventajas de su uso son la simplificación del proceso de cálculo y la reducción de posibles errores por la cantidad de valores numéricos involucrados. A través del calculador, también se calcula la incidencia porcentual de cada estrategia pasiva, para obtener una visualización rápida de las mismas.

ANÁLISIS

Primera etapa

A partir del relevamiento de los expedientes municipales, se sintetiza la información extraída de la documentación técnica en la Tabla 1. Para tal motivo se asigna un código a cada uno de los expedientes analizados para su identificación.

Tabla 1: Variables analizadas en las 23 viviendas. Fuente: elaboración propia.

N°	CÓDIGO	TERRENO			VIVIENDA			ENVOLVENTE			EPDA
		ORI	Superficie (m ²)		Superficie (m ²)		N	Techo tipo	CVE tipo	CVE Esp.	
1	2019 B 02	N	300,3	300 a 399	227,1	200 a 249	2	Liviano	Pesado	20 cm	32,41
2	2019 C 08	N	300,0	300 a 399	176,1	150 a 199	1	Liviano	Pesado	15 cm	28,76
3	2019 D 03	O	524,4	400 o más	98,9	50 a 99	1	Liviano	Pesado	20 cm	14,89
4	2019 D 04	S	103,0	100 a 199	182,8	150 a 199	2	Liviano	Pesado	20 cm	12,79
5	2019 M 04	N	250,0	200 a 299	199,5	150 a 199	2	Liviano	Pesado	15 cm	19,85
6	2019 R 01	S	360,0	300 a 399	82,0	50 a 99	1	Liviano	Pesado	15 cm	21,41
7	2019 R 04	E	226,2	200 a 299	136,6	100 a 149	1	Liviano	Pesado	15 cm	18,48
8	2019 V 03	N	856,6	400 o más	385,5	300 o más	2	Liviano	Pesado	20 cm	23,17
9	2019 W 01	O	260,0	200 a 299	38,0	0 a 49	1	Liviano	Pesado	15 cm	17,53
10	2019 Z 01	O	500,0	400 o más	82,2	50 a 99	1	Liviano	Pesado	15 cm	14,76
11	2018 B 01	S	315,7	300 a 399	402,8	300 o más	2	Liviano	Pesado	≥30 cm	39,05
12	2018 F 01	N	300,0	300 a 399	174,0	150 a 199	2	Liviano	Pesado	20 cm	23,01
13	2018 G 05	NO	269,7	200 a 299	253,0	250 a 299	2	Liviano	Pesado	≥30 cm	24,22
14	2018 G 07	N	300,3	300 a 399	181,9	150 a 199	1	Liviano	Pesado	20 cm	23,34
15	2018 L 01	N	295,0	200 a 299	80,0	50 a 99	1	Mixto	Pesado	15 cm	14,08
16	2018 M 02	E	300,0	300 a 399	319,1	200 a 249	2	Liviano	Pesado	20 cm	18,14
17	2018 M 11	N	160,0	100 a 199	60,0	50 a 99	1	Liviano	Pesado	15 cm	11,84
18	2018 N 01	N	300,9	300 a 399	231,3	200 a 249	2	Liviano	Pesado	15 cm	13,72
19	2018 P 04	E	308,0	300 a 399	164,2	150 a 199	1	Liviano	Pesado	20 cm	16,92
20	2018 S 05	N	300,3	300 a 399	188,3	150 a 199	1	Liviano	Pesado	20 cm	19,11
21	2018 S 06	O	301,7	300 a 399	79,0	50 a 99	1	Mixto	Pesado	20 cm	13,62
22	2018 U 01	S	250,0	200 a 299	162,5	150 a 199	1	Liviano	Pesado	15 cm	19,07
23	2018 V 01	S	340,5	300 a 399	338,8	300 o más	2	Mixto	Pesado	≥30 cm	23,29

Los resultados alcanzados en la primera etapa incluyen:

- Orientación del terreno (ORI): el 43,5 % de los terrenos poseen frente norte (10 casos); el 13 % frente este (3 casos); el 21,7 % frente sur (5 casos); el 17,4 % frente oeste (4 casos); y el 4,3 % frente noroeste (1 caso).
- Superficie del terreno (m²): el 8,7 % de los terrenos pertenece al grupo de 100 a 199 m² (2 casos); el 26,1 % al grupo de los 200 a 299 m² (6 casos); el 52,2 % al grupo de los 300 a 399 m² (12 casos); y el 13,0 % al grupo de 400 m² o más (3 casos).
- Superficie de la vivienda (m²): el 4,3 % de las viviendas pertenece al grupo de 0 a 49 m² (1 caso); el 26,1 % al grupo de los 50 a 99 m² (6 casos); el 4,3 % al grupo de los 100 a 149 m² (1 caso); el 34,8 % al grupo de los 150 a 199 m² (8 casos); el 13,0 % al grupo de 200 a 249 m² (3 casos); el 4,3 % al grupo de los 250 a 299 m² (1 caso); el 13,0 % al grupo de los 300 m² o más (3 casos).

- Niveles de la vivienda (cantidad): el 56,5 % de las viviendas corresponden a construcciones desarrolladas en planta baja (13 casos); el 43,5 % corresponden a construcciones desarrolladas en dos niveles, planta baja más planta alta (10 casos).
- Tipo de techo (liviano, mixto o pesado): el 91,3 % de la muestra clasifica como techo liviano (21 casos); solo 2 casos clasifican como techo mixto. A los fines del análisis EPDA, se consideran estos últimos dos como techos livianos, debido a que los techos pesados pertenecen en un caso a un garaje abierto y en el segundo caso a una servidumbre de paso con un bajo porcentaje de incidencia en la superficie total.
- Tipo de cerramiento vertical exterior (CVE liviano o pesado): la totalidad de la muestra clasifica como CVE pesado.
- Espesor del CVE (cm): el 43,5 % de los CVE revisten un espesor de 15 cm (10 casos); el 45,5 % un espesor de 20 cm (10 casos); el 13 % un espesor ≥ 30 cm (3 casos).

En términos generales, con relación a las características constructivas, la muestra analizada es heterogénea tanto en orientación y superficie de los terrenos como en cantidad de niveles y superficie de las viviendas. Por otro lado, es homogénea en cuanto a los tipos de techos (livianos en su totalidad) y de cerramientos verticales exteriores (mampuestos cerámicos macizos o huecos entre 15 y 30 cm). Con relación a las EPDA, los valores van desde un piso de 11,84 % a un techo de 39,05 %. El 30,4 % de la muestra clasifica en el grupo con menor desempeño (EPDA 0 a 14 %); el 60,9 % clasifica en el grupo con desempeño medio (EPDA 15 a 29 %); y solo el 8,7 % accede al grupo con mayor desempeño (EPDA 30 a 45 %).

Segunda etapa

Para definir los RAC se tiene en cuenta la planimetría de las viviendas, su memoria descriptiva e imágenes satelitales obtenidas en línea. Para considerar la aislación térmica de muros, en todos los casos se especificaba la técnica constructiva, para todos ellos mampostería de cerámica maciza o hueca. En el caso de los techos, no en todos los casos se especificaba la presencia de un aislante, por lo que se toma un valor "menos que C" para todos aquellos casos sin especificaciones. Para los vidrios, se tomó el coeficiente K mayor a 5 (vidrio común) en los casos en que no se especifica la materialización de estos, debido a que es la solución constructiva de mayor uso en la zona. En cuanto al color exterior de la envolvente, se buscaron imágenes satelitales y peatonales para identificar los tonos, cuando no fue posible, se selecciona la opción de "color mediano".

Para el resto de los RAC, la información brindada por la planimetría resultó suficiente. Altura, compacidad y proporción de ventanas en muros y techos se determinaron gracias a las acotaciones de los planos. Para la ventilación cruzada, se consideraron las ventanas enfrentadas dentro de un mismo local, los obstáculos al sol se observaron en la planimetría considerando las orientaciones. En cuanto a la hermeticidad, para todos los casos se tomó la opción "malo", ya que las carpinterías de aluminio de prestaciones deficientes son muy comunes en el medio y en ningún caso se contaba con alguna especificación a cerca de la calidad de estas.

La Fig. 1 presenta los valores EPDA obtenidos para los 23 casos estudiados. El valor más bajo de 11,84 % (barra color rojo) es obtenido por el expediente 2018_M_11. El valor más alto de 39,05 % (barra color verde) es obtenido por el expediente 2018_B_01. El resto de la muestra se concentra en valores que van desde 15 a 29 %, con un total de 14 casos para este rango.

El caso con menor porcentaje EPDA es el 2018_M_11. Consiste en una vivienda ubicada en un terreno entre medianeras con orientación norte-sur, la misma se emplaza adosada a la medianera oeste. Cuenta con una superficie construida entre 50 y 99 m². Los recursos arquitectónicos-constructivos considerados para su evaluación fueron determinantes. En cuanto a la aislación térmica, resulta crítica ya que en techo y muros es menor que C; en ventanas el k mayor que 5, por lo que se obtuvo el puntaje más bajo en este ítem. La inercia térmica de la envolvente es muy baja, se considera techo liviano y muros medianos. Otros RAC críticos son los referidos a la protección solar, ya que la vivienda no cuenta con ninguna estrategia para ello, por lo que en este ítem la puntuación es la más baja posible. Tampoco cuenta con posibilidad de calefacción solar pasiva directa o indirecta. En cuanto a la ventilación natural, no presenta ningún tipo y su entorno es 100 % pavimentado.

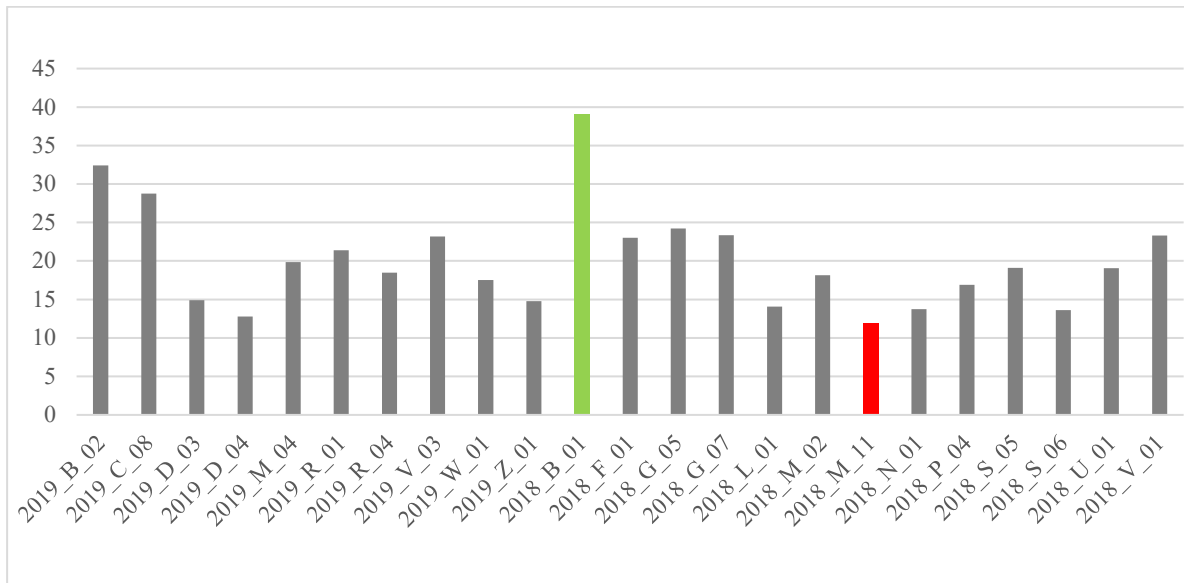


Figura 1: Porcentajes EPDA para las 23 viviendas analizadas. Fuente: elaboración propia.

Por su parte, el caso con mayor porcentaje EPDA es el 2018_B_01, 39,5 %. Se trata de una vivienda ubicada en un terreno entre medianeras, frente sur. Para este caso los RAC referidos a propiedades de los materiales de la envolvente tienen mejores prestaciones que en el resto de los casos. Tanto muros como techo alcanzan el nivel C de confort higrotérmico, las ventanas presentan un k entre 3,5 y 5; además, los muros exteriores son pesados, lo que le otorga mayor puntaje por inercia térmica. Las ventanas cuentan con protección solar, por lo que se considera para el RAC en sombreado de ventanas una protección del 90 %. Otros RAC en los que se obtiene buen puntaje son los colores de las superficies exteriores, en todos los casos claros. Permite un mínimo de ventilación cruzada, 25%. Por último, otro RAC en el que cuenta con un puntaje superior en relación con el resto de las viviendas es la hermeticidad de carpinterías (obtiene calificación “regular”), ya que en la memoria técnica especifican el uso de burletes para las mismas.

La Fig. 2 expone los porcentajes RAC para las 23 viviendas. En cuanto a la ponderación para cada estrategia pasiva de diseño arquitectónico, resulta muy relevante la baja aislación térmica en todos los casos, el 90 % de los casos se encuentra por debajo de un 20 %. Para el caso de la protección solar, los resultados resultan muy variados, en algunos casos dicha estrategia supera en verano el 60 %, cabe aclarar que esto se debe a obstrucciones solares fortuitas y no a diseños pensados en busca de protección solar. El entorno, resulta favorable para la mayoría, 68 %, esto se debe a la baja densidad del municipio, sin embargo, el 32 % de los casos, tiene un entorno inferior al 40 % del uso de esta estrategia. Sobre la ventilación natural, estrategia altamente relevante en zonas cálidas, en la totalidad de los casos se encuentra por debajo del 30 %, llegando a ser nula en algunas situaciones.

DISCUSIONES

Debido a limitaciones en la normativa, no es posible realizar la ponderación EPDA con datos climáticos de la localidad donde se ubica la ciudad de Concepción, por lo que se usan los valores asignados para San Miguel de Tucumán. Esta situación resulta factible, ya que tanto San Miguel de Tucumán como Concepción pertenecen a la zona bioclimática II, cálida, según IRAM 11603, que revisten idénticas estrategias de diseño a considerar.

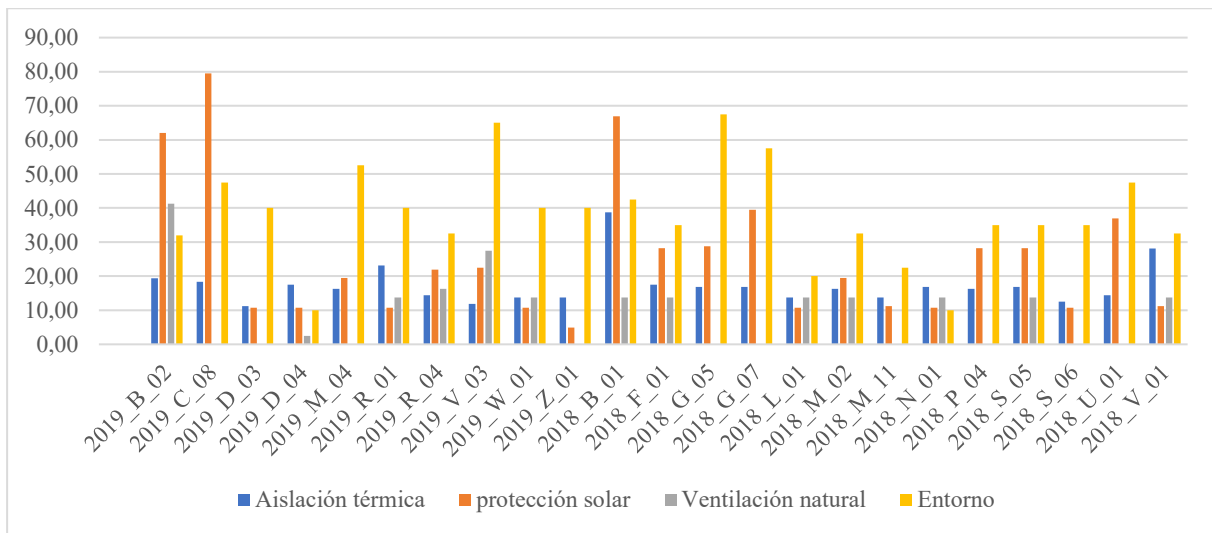


Figura 2: Porcentajes RAC para las 23 viviendas analizadas. Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

El presente trabajo realiza una aproximación al análisis de las EPDA en la producción actual de viviendas de baja densidad en la ciudad de Concepción, Tucumán. Sobre las 23 viviendas estudiadas, correspondientes a los permisos de construcción emitidos por el Municipio en los años 2018 y 2019, se obtienen datos cuanti-cualitativos sobre las características constructivas y los valores EPDA.

Los resultados obtenidos permiten determinar, por un lado, que la práctica constructiva en la ciudad de Concepción reproduce un modelo de vivienda de baja densidad que, dejando de lado el tamaño del terreno y la superficie proyectada de la vivienda, se constituye por techos livianos con cubiertas de chapas y paredes de mamposterías de ladrillos macizos o huecos. Por otro lado, este trabajo permite inferir a partir de los bajos porcentajes alcanzados del análisis EPDA (91,3 % de la muestra por debajo del 29,0 %), que los proyectos de arquitectura analizados no incluyen estrategias pasivas en su elaboración. Asimismo, que las pocas estrategias pasivas identificadas en los proyectos son el resultado fortuito de la organización funcional de los locales, o en su defecto, se presentan como estrategias que, aunque hayan sido planteadas, no alcanzan altos porcentajes de funcionamiento (como la identificación de ventilación cruzada en solo uno de tres ambientes de una vivienda).

Tomando como punto de partida una práctica constructiva local que produce un modelo de vivienda de baja densidad que carecería de EPDA en su fase de proyecto, el presente trabajo se permite preguntar ¿cuáles son los motivos de la falta de incorporación de EPDA en el proceso de diseño?; ¿cuáles son los actores clave de la práctica constructiva que tienen mayor incidencia en el posible uso de las EPDA?; y finalmente, ¿qué resultados arquitectónicos se pueden obtener ante la incorporación de EPDA en la práctica constructiva local?

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección de Desarrollo Urbano de la Municipalidad de Concepción.

REFERENCIAS

Arballo, B. D., Kuchen, E. y Chuk, D. (2022). Optimización multiobjetivo de la eficiencia energética y el confort térmico en edificios de oficina públicos. Periodo crítico de verano en la ciudad de San Juan, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 12(1), 102–113. <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.07>

- Castaño Duque, S. y Osorio Valencia, J. J. (2013). Sobre la arquitectura bioclimática en el marco de la sustentabilidad. *Arquetipo*, 7, 103-114.
- Fernández, A. y Garzón, B. (2019). C-EBioDA: Calculador de Estrategias Bioclimáticas de Diseño Arquitectónico, según NORMA IRAM 11900. Obra inédita no musical inscrita en Dirección Nacional de Derechos del Autor (DNDA), expediente: EX-2019-89171618- -APN-DNDA#MJ. Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), octubre de 2019.
- IRAM 11603 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2012). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. Tercera edición.
- IRAM 11900 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2017). Prestaciones energéticas en viviendas, Método de cálculo. Segunda edición.
- IRAM 11900 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2019). Modificación N°1 a la Norma IRAM 11900:2017-12.
- Kuchen, E. y Kozak, D. (2020). Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: Vivienda de Barrio Papa Francisco. *Hábitat Sustentable*, 10(1), 44-55. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.04>
- Maristany, A. (2020). Ambiente, tecnología y diseño sustentable. Las preexistencias ambientales y su impacto en la calidad de vida, el confort y la eficiencia energética. 1a edición compendiada. Córdoba. Editorial de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de Córdoba.

EPDA ANALYSIS IN LOW DENSITY HOUSES BUILT IN THE CITY OF CONCEPCION IN THE PERIOD 2018 TO 2019

ABSTRACT: The objective of this paper is to analyze the passive strategies of architectural design (EPDA) used in a sample of 23 low-density houses of private production extracted from the city of Concepción, Tucumán, Argentina. The houses respond to the municipal records of private works approved by the city council. The EPDA analysis, established in Modification No. 1 of the IRAM 11900 standard, is a valuation of the housing design against the climatic conditions of each region. The EPDA ponderation, is carried out by the C-EBioDA calculator that allows to obtain a percentage of application of EPDA. The results cover the similarities, both in the architectural-construction resources (RAC) and in the design strategies used in the 23 dwellings, and the differences in the EPDA evaluations.

Keywords: sustainable architecture, bioclimatic architecture, building practice.

PAVIMENTOS DE ASFALTO Y HORMIGÓN MODIFICADOS PARA MEJORAR EL MICROCLIMA URBANO

Pablo Cabrera¹, Gerardo Botasso¹, Ana M. Castro Luna^{2,3}

¹Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CICPBA LEMaC

²Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires CICPBA,

³Energías Renovables, Tecnología y Desarrollo Sustentable, EnAITecS, Codapli, UTN FRLP

Tel. +5492214951990 e-mail: pcabrera@frlp.utn.edu.ar

RESUMEN: En las últimas décadas, el desplazamiento continuo de la población rural hacia centros urbanos hizo necesario construir más viviendas y vías de acceso, lo que modificó negativamente al medioambiente. La sustitución del suelo natural por pavimento asfáltico o de hormigón, imprescindibles para la infraestructura de transporte, ha sido en parte responsable del cambio mencionado. En la ciudad, los pavimentos al impedir la infiltración del agua de lluvia provocan inundaciones, en verano las superficies se calientan considerablemente por la incidencia de la radiación solar. Parte del calor solar absorbido por los pavimentos es devuelto al ambiente. La temperatura del aire se incrementa en la ciudad con respecto a aquella de la región rural circundante, provocando el efecto Isla de Calor Urbano, ICU. Es posible mejorar la calidad del medioambiente urbano modificando la estructura y las propiedades termofísicas del pavimento clásico, si se agregan materiales de alta reflectancia de la radiación solar incidente, alta emisividad del calor absorbido, buena difusividad, e inercia térmica moderada. En este trabajo se estudia el comportamiento térmico de muestras densas de pavimento asfáltico y de hormigón calentadas con luz solar, en la terraza de la UTN FRLP ciudad de La Plata, en el verano 2022/2023.

Palabras clave: energía solar, isla de calor urbano, pavimentos, microclima.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desplazamiento continuo de la población rural hacia centros urbanos hizo necesario construir más viviendas y vías de acceso. La sustitución del suelo natural por pavimento asfáltico o de hormigón, imprescindibles para la infraestructura de transporte, ha sido en parte responsable de cambios negativos que afectan la calidad del medioambiente. Ya que, en la ciudad, los pavimentos de las calles impiden la infiltración del agua de lluvia, se calientan en verano por la incidencia de la radiación solar y gran parte del calor solar absorbido por los pavimentos es devuelto al ambiente.

¹El pavimento de mezcla asfáltica de baja conductividad térmica y calor específico alto, por su color oscuro, actúa como cuerpo negro, absorbe gran parte de la radiación solar incidente y la almacena como calor, el cual de acuerdo con la temperatura que alcanza el pavimento es en parte transferido por

¹Cuando la radiación solar incide en el pavimento, una porción de la misma se refleja al ambiente, mientras que el resto es absorbido por el pavimento, la relación de la radiación reflejada a la radiación solar incidente se denomina albedo. La inercia térmica es la capacidad de un material para absorber y liberar energía. La difusividad térmica es la conductividad térmica dividida por la densidad y la capacidad calorífica específica a presión constante. Alta difusividad significa que el calor se transfiere rápidamente. Un alto valor de difusividad térmica aumenta las temperaturas internas en una superficie, mientras que una baja difusividad térmica aumenta el almacenamiento de calor y disminuye la conductividad (Qin y Hiller, 2014; Acharya et al., 2021).

conducción térmica al interior de la capa asfáltica como calor y, además, es emitido desde la superficie al medio ambiente como radiación en la región del infrarrojo del espectro electromagnético.

Existe también un flujo de calor por convección natural desde la superficie de la muestra caliente al aire circundante y, por tanto, una modificación del microclima local en la zona pavimentada.

Los microclimas urbanos son más cálidos que los de los entornos rurales circundantes, lo que da lugar a un efecto denominado isla de calor urbano, ICU (Qin, 2015; Shahmohamadi et al., 2010).

Los resultados de numerosas investigaciones muestran que la modificación de los materiales del pavimento y la reducción de la temperatura en la superficie del mismo, son esenciales para lograr una reducción del efecto ICU (Santamouris, 2013). Este efecto tiene varias consecuencias asociadas, tales como un aumento en la demanda de energía de enfriamiento para aliviar temperaturas elevadas en oficinas, domicilios, comercios, etc. La producción convencional de energía implica un riesgo creciente para la salud humana, por la formación de grandes cantidades de contaminantes del aire, que degradan su calidad. En pocas palabras, los efectos de la ICU derivan en un entorno inadecuado para el desarrollo de la vida.

Los pavimentos convencionales de mezcla asfáltica densa, conductividad térmica $1,00 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y calor específico $920 \text{ J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ o de hormigón conductividad térmica $1,73 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y calor específico $880 \text{ J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Correa et al., 2003) son pavimentos ampliamente utilizados en las áreas urbanas por su buen desempeño vial, bajos costos de mantenimiento y reducción del ruido. Una temperatura superficial elevada en el pavimento afecta negativamente la rigidez del aglutinante y provoca surcos en la superficie. La velocidad de oxidación del asfalto aumenta con la temperatura del pavimento y es la causa principal del envejecimiento prematuro de la estructura y el desarrollo de grietas (Badin, 2023).

Es posible mejorar la calidad del medio ambiente urbano si se modifican la estructura y las propiedades termofísicas de un pavimento clásico, utilizando materiales que tengan alta reflectancia de la radiación solar incidente, alta emisividad del calor absorbido, buena difusividad, así como una inercia térmica moderada (Santamouris et al., 2015; Badin et al., 2021). El TiO_2 es un pigmento ampliamente utilizado para desarrollar materiales fríos que, además, contribuye como fotocatalizador en la eliminación de una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos del aire (Fernández-Mira et al., 2021).

En este trabajo se estudia el comportamiento térmico de muestras densas de pavimento asfáltico y de hormigón convencional, sin y con modificación, calentadas con luz solar, en la terraza de la UTN FRLP ciudad de La Plata, en el verano de 2022/2023.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras estudiadas se modificaron superficialmente con recubrimientos de diferentes colores (blanco, amarillo ocre y verde), transitables y de gran duración. Los recubrimientos consisten en emulsiones acrílicas elastoméricas con fibras incorporadas, que proporcionan flexibilidad y resistencia para impedir las fisuras causadas por los cambios de temperatura y humedad. También se analizaron muestras de pavimento de asfalto y de hormigón luego de la adición de TiO_2 a la composición másica dosificada de las mismas.

Se estudió el comportamiento térmico de probetas de pavimento asfáltico, densidad 2290 Kg m^{-3} , y de hormigón, densidad 2389 Kg m^{-3} , con dimensiones $0,30 \text{ m} \times 0,30 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}$. Usando termocuplas K y adquirentes de datos Testo 176T4 multicanal, se registraron las temperaturas durante las etapas de calentamiento y enfriamiento, no solo en la superficie, T_s , sino también a 2 y 4 cm de profundidad, T_2 y T_4 , respectivamente. En el transcurso de diciembre de 2022 y enero de 2023, las muestras se analizaron durante su exposición a la radiación solar. Se utilizó una cámara termográfica Testo 865, con una resolución de infrarrojos de 320×240 píxeles y una visualización de diferencias en la temperatura de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, para estimar las emisividades ϵ de cada muestra, así como también para confirmar las temperaturas superficiales registradas por las termocuplas. Mediante la aplicación de

software libre se obtuvo el calor acumulado en cada muestra sin y con modificación. Una de las probetas de asfalto y otra de hormigón, se separaron como muestras de referencia, y a las restantes se les aplicó un recubrimiento superficial de aproximadamente $0,2 \times 10^{-3}$ m de espesor. También se prepararon dos muestras, modificadas en su composición porcentual para incorporar 5% del pigmento TiO_2 de conductividad térmica $7,4 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, resultando un pavimento asfáltico de densidad 2405 Kg m^{-3} y otro de hormigón de densidad 2512 Kg m^{-3} .

La composición y dosificación de pavimentos de asfalto y de hormigón se muestran en la Tabla 1. Las composiciones y dosificaciones de ambos tipos de pavimentos, modificados con TiO_2 se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Composición del pavimento asfáltico y de hormigón denso.

PAVIMENTO ASFÁLTICO		HORMIGÓN	
Material	Dosificación (%)	Material	Dosificación (%)
Agregado grueso granítico 6:12	38	Agua	7
Arena trituración granítica 0:6	56	Cemento Pórtland	15
Cal hidráulica hidratada	1	Arena trituración	37
Asfalto CA30	5	Agregado grueso granítico 6:20	41
TOTAL	100	TOTAL	100

Tabla 2: Composición del pavimento asfáltico y de hormigón con TiO_2 en mezcla.

PAVIMENTO ASFÁLTICO c/ TiO_2		HORMIGÓN c/ TiO_2	
Material	Dosificación (%)	Material	Dosificación (%)
Agregado grueso granítico 6:12	36	Agua	7
Arena de trituración granítica 0:6	53	Cemento Pórtland	14
Cal hidráulica hidratada	1	Arena trituración	35
Asfalto CA30	5	Agregado grueso granítico 6:20	39
TiO_2	5	TiO_2	5
TOTAL	100	TOTAL	100

En este trabajo se utilizará “°C” como unidad de medida para la temperatura, ya que todos los instrumentos de medición utilizados proveen los datos en dicha unidad.

RESULTADOS

Los datos de temperatura ambiente e irradiancia solar en los días que se realizaron las medidas al aire libre fueron suministrados por el Departamento de Sismología e Información Meteorológica – FCAG – UNLP.

Influencia del color del recubrimiento superficial en el comportamiento térmico de los pavimentos

Se analizó el comportamiento térmico de muestras de PA - Pavimento Asfáltico, y de PH –Pavimento de Hormigón, sin y con recubrimiento superficial de colores diferentes, cuando se expusieron un día completo al aire libre.

En la Fig. 1a, se representa la variación de la temperatura superficial, T_s , registrada en las muestras de PA sin y con recubrimiento superficial. Se observa una disminución en la temperatura superficial según el color del recubrimiento.

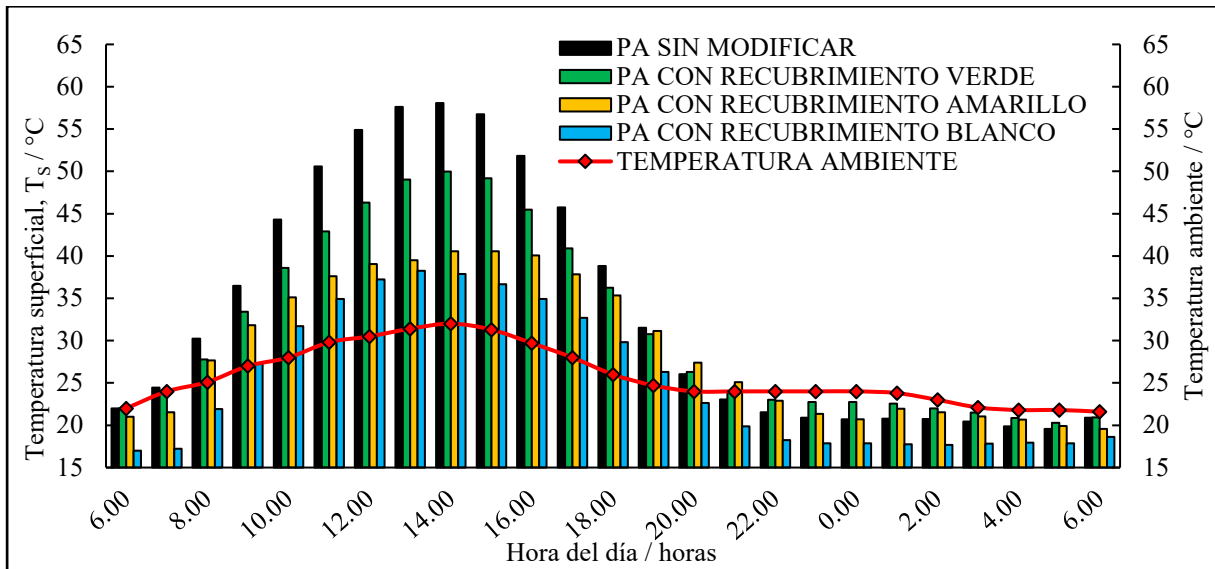


Figura 1a: Variación horaria de las temperaturas superficiales, T_s , de muestras de PA sin y con recubrimientos coloreados, expuestas un día completo al aire libre.

Durante el día, todas las superficies de PA recubiertas alcanzaron temperaturas superficiales, T_s , más bajas en comparación con aquellas de la muestra sin recubrimiento. Es posible asociar un mayor albedo al recubrimiento más claro (Santamouris et al., 2015). Durante la noche todas las muestras, sin y con recubrimiento, alcanzaron temperaturas inferiores a las temperaturas ambiente. La superficie recubierta de blanco es la más fría durante la noche.

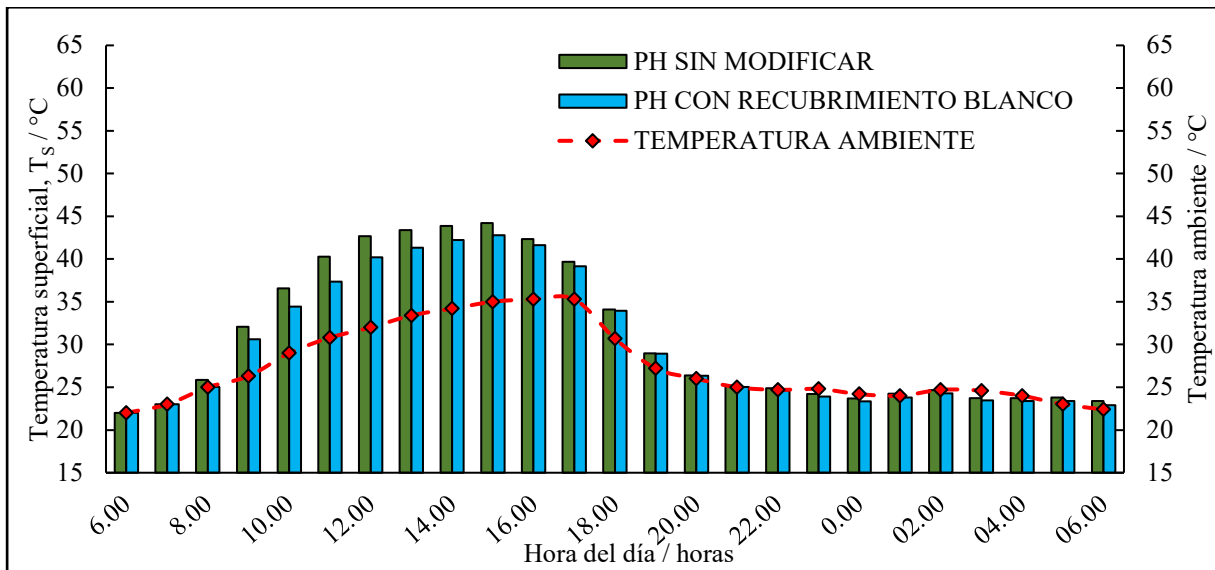


Figura 1b: Variación horaria de las temperaturas superficiales, T_s , de muestras de PH, sin y con recubrimiento blanco, expuestas un día completo al aire libre.

En la Fig. 1b se representa la variación de la temperatura superficial de muestras de PH, sin y con recubrimiento superficial blanco. Se observa que durante el día la temperatura superficial de la muestra con recubrimiento superficial blanco es ligeramente inferior a la de la muestra sin recubrimiento. Durante la noche las muestras de hormigón, sin y con recubrimiento blanco, alcanzan temperaturas superficiales próximas a las temperaturas ambiente.

Análisis del comportamiento térmico de probetas de PA y PH con TiO_2 o con recubrimiento superficial blanco.

En probetas de PA sin y con recubrimiento superficial blanco, así como en una que contiene TiO_2 en la composición de la mezcla, se analiza el cambio de temperatura superficial, T_s , según la variación horaria durante un día completo, Fig. 2a. Se observa que el PA sin modificar muestra valores de

temperatura superficial mayores que la muestra con TiO_2 , mientras que los menores valores de temperatura superficial son exhibidos por la muestra con recubrimiento superficial blanco.

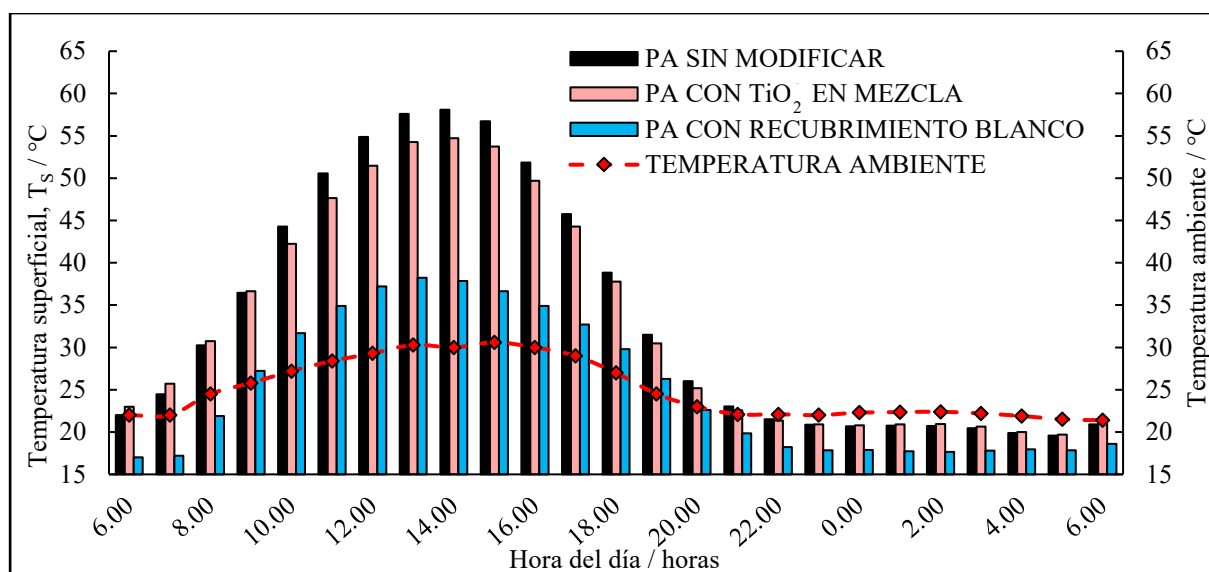


Figura 2a: Variación horaria de las temperaturas superficiales, T_s , de muestras de PA sin y con recubrimiento blanco o con TiO_2 en su composición, todas expuestas un día completo al aire libre.

La incorporación de TiO_2 al PA le confiere a la nueva muestra un tono verde grisáceo por lo que la cantidad de radiación solar reflejada será menor que la reflejada por la muestra con recubrimiento blanco.

Es posible que la ligera disminución en la temperatura superficial de la muestra con TiO_2 pueda ser debida, en parte, a la modificación del color del PA, y también a un aumento en la conductividad térmica causado por el agregado de TiO_2 (Badin et al., 2021). Se observa también que la textura superficial de la probeta con incorporación de TiO_2 es más rugosa que aquella con recubrimiento blanco. El albedo de una superficie es mayor si esta es lisa y de color blanco (Santamouris, 2013). Se concluye que para disminuir la temperatura superficial del pavimento asfáltico resulta más conveniente recubrir de blanco la superficie de la muestra.

La misma experiencia se realizó con las muestras de hormigón, sin y con modificación ya sea en su superficie (recubrimiento blanco), o en su composición (agregado de TiO_2), Fig. 2b. Durante el período de exposición solar, los menores valores de temperatura superficial corresponden a la muestra que contiene TiO_2 . Probablemente la adición de TiO_2 incrementa la conductividad térmica de la muestra de hormigón, facilitando la transferencia de calor hacia el interior de esta. Las superficies de las muestras de hormigón con recubrimiento blanco o con incorporación de TiO_2 , son blancas y de textura lisa, por lo que los valores de albedo no serán diferentes (Santamouris, 2013). Durante la noche las muestras de hormigón, sin y con modificación, alcanzan temperaturas superficiales similares a las temperaturas ambiente, debido a la inercia térmica, la cual se incrementa en la muestra con incorporación de TiO_2 .

En las muestras de PA y PH, sin y con agregado de TiO_2 , Figs. 3a y b, se analiza la variación de temperatura a 2 y 4 cm de profundidad, T_2 y T_4 respectivamente, durante la exposición al aire libre de las muestras por un día completo.

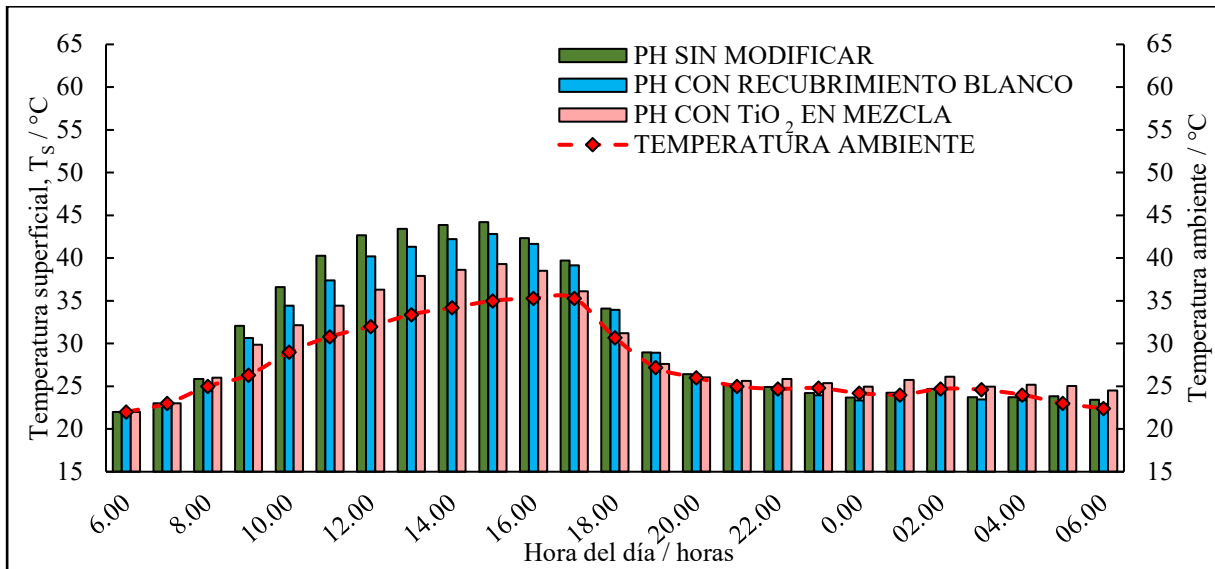


Figura 2b: Variación horaria de las temperaturas superficiales, T_s , de muestras de PH sin y con recubrimiento blanco o con TiO_2 en su composición, todas expuestas un día completo al aire libre.

Analizando los valores de T_2 y T_4 en las muestras de PA sin y con incorporación de TiO_2 , Fig. 3a, se observa que, durante el período de calentamiento en la mañana, el aumento en T_2 en ambas muestras es mayor que el observado en T_4 , confirmando que la transferencia de calor a 2 cm de la superficie es mayor que a 4 cm (Badin et al., 2021). La diferencia entre T_2 y T_4 para la muestra de PA con TiO_2 , por su mayor conductividad térmica, es menor que para la muestra sin modificar.

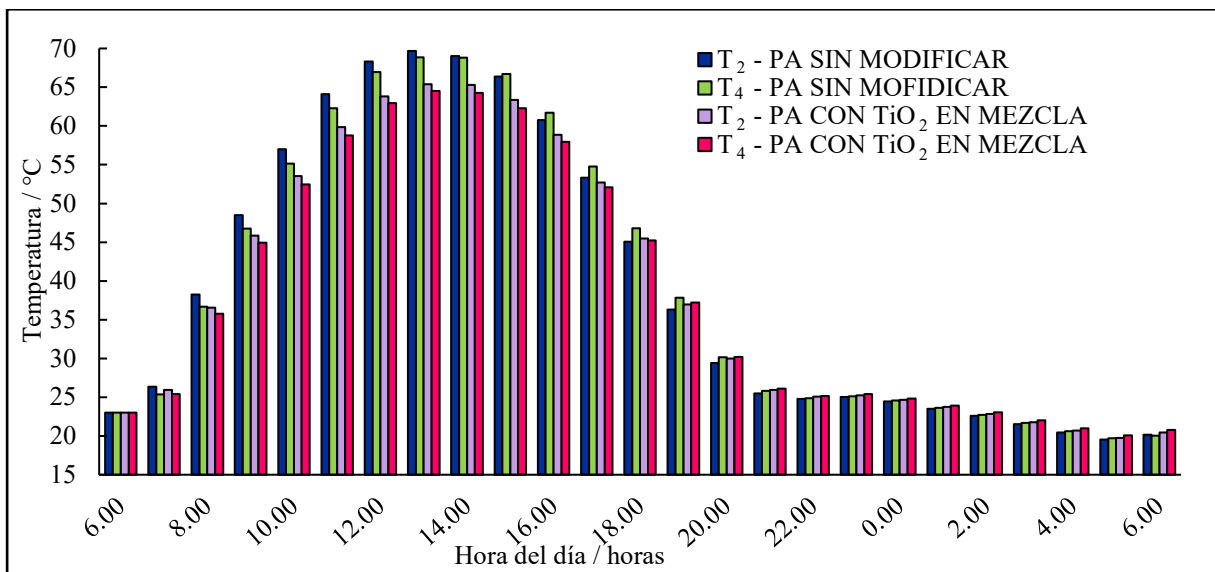


Figura 3a: Variación de las T_2 y T_4 en muestras de PA sin y con TiO_2 expuestas un día completo al aire libre.

Cuando las muestras comienzan a enfriarse después del cenit (posición del sol en el mediodía solar), se observa que T_2 en la muestra de PA sin modificar disminuye más rápido que T_2 en el pavimento modificado con TiO_2 , y que T_4 en la muestra de PA sin modificar es mayor que en la muestra modificada con TiO_2 . Este comportamiento se asocia a la contribución de la conductividad térmica del TiO_2 .

Durante la noche se observa que, para ambas muestras, T_2 y T_4 prácticamente alcanzan los mismos valores.

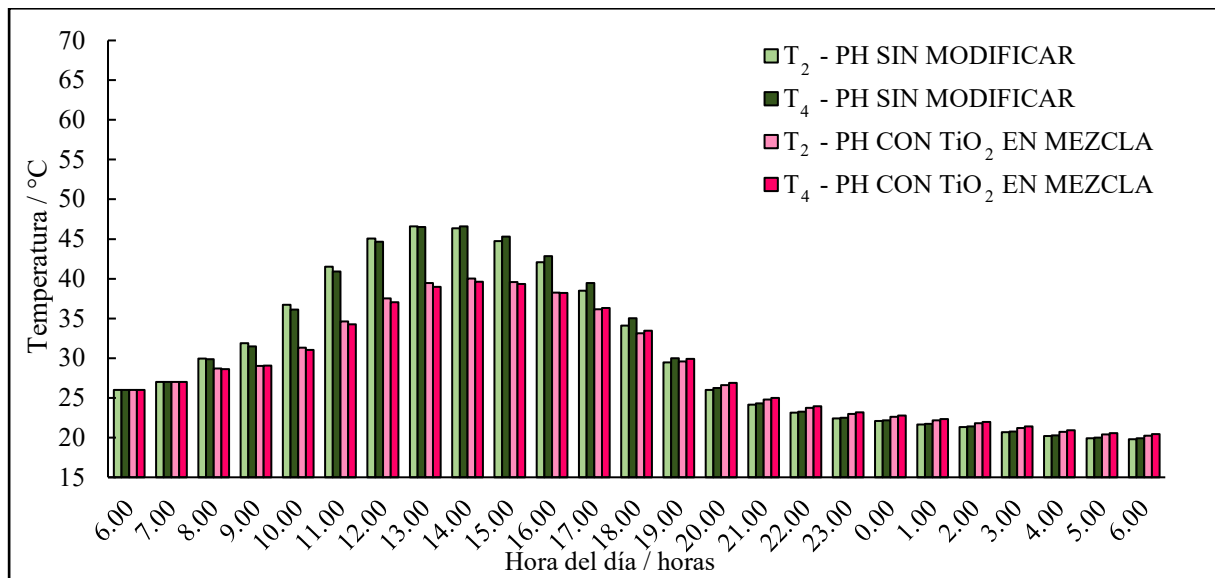


Figura 3b: Variación de T_2 y T_4 en muestras de PH sin y con TiO_2 , expuestas un día completo al aire libre.

Analizando los valores de T_2 y T_4 en las muestras de PH, sin y con incorporación de TiO_2 , Fig. 3b, se observa que, en la mañana hasta alcanzar el cenit, el valor de T_2 en ambas muestras es mayor que el medido en T_4 .

Cuando las muestras comienzan a enfriarse más allá del cenit, se observa que los valores de T_2 y T_4 en la muestra sin modificar disminuyen más rápidamente que en las muestras modificadas con TiO_2 .

Durante la noche, se observa que T_2 y T_4 decrecen con mayor lentitud en la muestra de hormigón con TiO_2 . El PH modificado, con mayor conductividad térmica, mayor densidad, y mayor inercia térmica absorbe y cede el calor lentamente.

Energía acumulada en las probetas de PA y PH analizadas

Haciendo uso de los gráficos de las Fig. 1a, y 2a y b, y recurriendo a la librería de libre acceso, SciPy (Virtanen et al., 2020), y en ella al algoritmo de integración numérica por el método de Simpson, es posible realizar la integración de las curvas experimentales de la temperatura superficial en el intervalo de tiempo que dura la experiencia. Considerando que las temperaturas registradas en la superficie de cada muestra resultan de un balance energético que toma en cuenta la energía que ingresa y egresa a la misma, se calcula la cantidad de energía acumulada en la muestra luego de realizar una corrección que toma en cuenta la variación de temperatura del medioambiente en el mismo período de tiempo. Los resultados se muestran en las Tablas 3 y 4.

Se infiere de la Tabla 3 que el PA acumula más calor cuando no se modifica superficialmente o se adiciona TiO_2 . Por otra parte, es notable observar como el recubrimiento blanco es más efectivo en cuanto a disminuir la cantidad de calor almacenada, siendo el recubrimiento verde el menos efectivo.

Tabla 3: Energía acumulada en PA luego de 24 horas al aire libre.

PA SIN MODIFICAR	2200,4	W/m ²
PA CON TiO_2 EN MEZCLA	2126,7	W/m ²
PA CON RECUBRIMIENTO VERDE	1529,4	W/m ²
PA CON RECUBRIMIENTO AMARILLO	1228,9	W/m ²
PA CON RECUBRIMIENTO BLANCO	676,9	W/m ²

En la Tabla 4 se muestra que el PH modificado por recubrimiento blanco, o por la adición de TiO_2 , almacena menos energía que el PH sin modificar. Un pavimento con mayor conductividad térmica

tiene una menor temperatura superficial (Oleiwi Aletba et al., 2021). La adición de TiO_2 cumple una doble función en el caso del PH, aumenta la conductividad térmica y el albedo.

Tabla 4: Energía acumulada en PH luego de 24 hs al aire libre.

PH SIN MODIFICAR	925	W/m ²
PH CON RECUBRIMIENTO BLANCO	650,1	W/m ²
PH CON TiO_2 EN MEZCLA	511,2	W/m ²

Se puede observar que en el PH sin modificación la cantidad de calor acumulada es menor que aquella en el PA, lo que es atribuible a una menor absorción de radiación solar ya que el PH tiene un albedo mayor (albedo del asfalto 0,1 y del hormigón 0,45) (Oleiwi Aletba et al., 2021; Balter et al., 2021).

Análisis de las imágenes térmicas

En la Fig. 4 se muestran las imágenes térmicas registradas con diferentes muestras de PA, sin y con recubrimiento, cuando de acuerdo con registros almacenados, la temperatura superficial es máxima. Se han agregado las imágenes registradas cada 10 minutos, durante casi una hora, cuando el sol se ocultaba en el horizonte ese día. Se observa de acuerdo a la escala cromática de temperatura, que las imágenes térmicas de los PA se corresponden con el comportamiento térmico superficial registrado con termocuplas y mostrado en la Fig. 1a, siendo la temperatura superficial máxima la de la probeta de PA sin modificar. Además, si se observa la evolución de las temperaturas durante el enfriamiento de las muestras, ya que, por la hora, corresponde a una disminución de la cantidad de radiación solar incidente en la misma, se aprecia que aquella con recubrimiento blanco, se enfría a mayor velocidad.

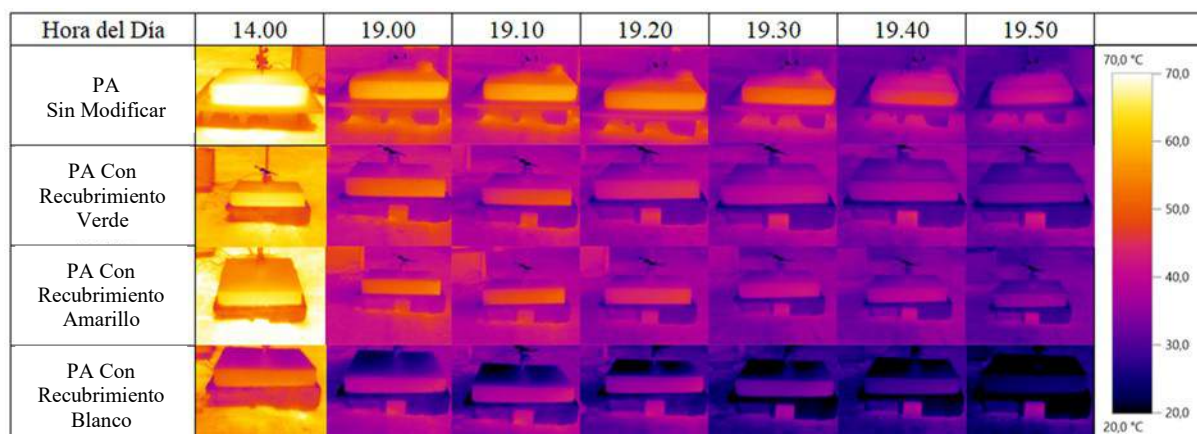


Figura 4: Imágenes térmicas de muestras de PA expuestas al sol a diferentes horas sin y con recubrimiento.

En la Fig. 5 se muestran las imágenes térmicas correspondientes a las muestras de PA y PH, sin y con agregado de TiO_2 , registradas a las 14 h cuando el sol está en el cenit y la temperatura superficial es máxima en ambas muestras.

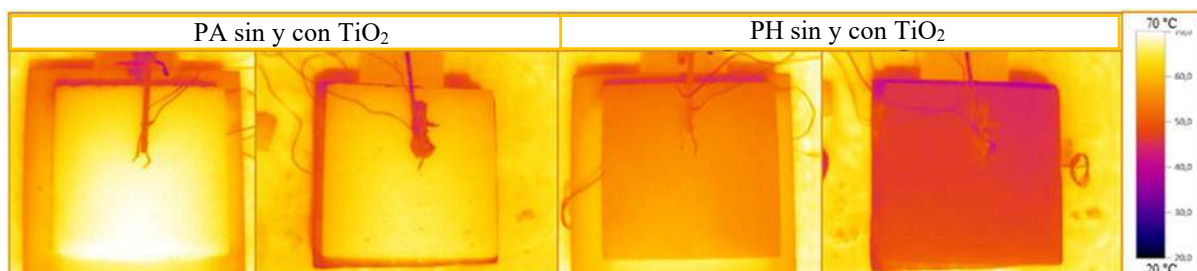


Figura 5: Imágenes térmicas de muestras de PA y PH sin y con incorporación de TiO_2 .

Se puede observar en las imágenes térmicas de la Fig. 5, de acuerdo a la escala cromática de temperatura, que las muestras de PA o PH que contienen TiO_2 , están superficialmente más frías, lo que

se puede atribuir, en el caso del PA a un ligero incremento de su albedo y a un aumento de su conductividad térmica por el TiO₂ agregado, y en el caso del PH de aspecto blanco, a la combinación de mayor reflectancia solar del material con TiO₂ sumada a la mayor conductividad térmica del TiO₂.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el comportamiento térmico de PA- Pavimento Asfáltico, y PH – Pavimento de Hormigón, sin y con modificaciones, ya sean en superficie o en composición, y su influencia en el microclima urbano cuando se exponen durante un día completo al aire libre.

Se determinó experimentalmente que el PA, por ser de color oscuro, absorbe una gran porción de la radiación solar incidente y su temperatura superficial es elevada, Fig. 2a. El calor que almacena durante el período de irradiación está concentrado cerca de la superficie de la probeta, Fig.3a, porque este pavimento tiene baja conductividad térmica. Por otro lado, el PH, por ser de color claro, refleja una mayor porción de la radiación solar incidente y, por su mayor conductividad térmica, distribuye el calor almacenado hacia el interior de este. Ambos factores contribuyen a disminuir la temperatura superficial del PH durante el día, Fig. 1b.

En cuanto a la contribución de los pavimentos a mejorar el microclima urbano, tanto en el día como en la noche, la modificación más efectiva sería que el PA tenga un recubrimiento superficial blanco, Fig. 2a. Por otro lado, la incorporación de TiO₂ al PH contribuye a mejorar el microclima urbano durante el día, Fig. 2b.

En la noche, el PA con o sin recubrimiento blanco, libera el calor acumulado más fácilmente que el PH sin o con modificación por TiO₂. Este comportamiento se justifica por la mayor inercia térmica del PH que libera lentamente el calor acumulado durante toda la noche, contribuyendo de modo continuo a la ICU nocturna.

AGRADECIMIENTOS

PC, GB y AMCL agradecen el soporte financiero de UTN-FRLP. PC agradece la beca doctoral otorgada por CONICET, AMCL es investigadora científica de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, CICPBA.

REFERENCIAS

- Acharya T., Riehl B., Fuchs A. (2021). Effects of Albedo and Thermal Inertia on Pavement Surface Temperatures with Convective Boundary Conditions—A CFD Study. *Processes*, 9 (11), 2078. <https://doi.org/10.3390/pr9112078>.
- Badin G., Ahmad N., Ali H.M., Ahmad T., Jameel M.S. (2021). Effect of addition of pigments on thermal characteristics and the resulting performance enhancement of asphalt. *Construction and Building Materials*, 302, 124212. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124212>.
- Badin G., Huang Y., Ahmad N. (2023). Comparative Analysis of Thermally Investigated Pigment-Modified Asphalt Binders. *Airfield and Highway Pavements*, pp. 174 -184. <https://doi.org/10.1061/9780784484913>.
- Balter J., Alchapar N., Correa E., Ganem C. (2021). Modelado urbano microclimático para la simulación termo-energética de viviendas en edificios en altura en Mendoza, Argentina. Integración del software ENVI-met y EnergyPlus. *Informes de la Construcción*, Vol. 73(561): e382. <https://doi.org/10.3989/ic.76749>.
- Chen J., Zhou Z., Hou S., Liu M. (2019). Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials. *Construction and Building Materials*, 202, 46–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.028>.
- Correa E.N., Flores Larsen S., Lesino G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7 (2), 25-30.
- Fernández-Mira M., Jimenez-Relinque E., Martínez I., Castellote M. (2021). Evaluation of changes in surfaces temperature of TiO₂ functionalized pavements at outdoor conditions. *Energy and Building*, 237, 110817. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110817>.

- Qin Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.177>.
- Qin Y. y Hiller J.E. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy Build*, 85, 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>.
- Oleiwi Aletba S.R., Hassan N.A., Jaya, R.P., Aminudin E., Hanif Mahmud M.Z., Mohamed A., Hussein A.A. (2021). Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: a state-of-the-art review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.02.001>.
- Santamouris M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp. 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>.
- Santamouris M., Synnefa A., Karlessi T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85, 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>.
- Shahmohamadi P., Che-Ani A.I., Ramly A., Maulud K.N.A., Mohd-Nor M.F.I. (2010). Reducing urban heat island effects: A systematic review to achieve energy consumption balance. *International Journal of Physical Sciences*, 5 (6), 626-636.
- Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M., y otros. (2020) *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*. *Nature Methods*, 17 (3), 261-272. URL: <http://www.scipy.org/>

MODIFIED ASPHALT AND CONCRETE PAVEMENTS TO IMPROVE THE URBAN MICROCLIMATE

ABSTRACT: In the last decades, the steady shift of the rural population to urban centers made it necessary to build more housing and access roads, which had a negative impact in the environment. The replacement of natural soil with asphalt or concrete pavement, essential for transportation infrastructure, has been partly responsible for the change mentioned. In cities, pavements prevent rainwater from infiltrating, leading to flooding, and during summer, surfaces heat up significantly due to solar radiation. Part of the solar heat absorbed by pavements is released into the environment. The air temperature in the city rises compared to that of the surrounding rural region, causing the Urban Heat Island (UHI) effect. It is possible to improve the quality of the urban environment by modifying the structure and thermophysical properties of traditional pavement, adding materials with high reflectance of incident solar radiation, high emissivity of absorbed heat, good thermal diffusivity, and moderate thermal inertia. This study examines the thermal behavior of dense samples of asphalt and concrete pavement heated by sunlight on the rooftop of UTN FRLP in the city of La Plata during the summer of 2022/2023.

Keywords: solar energy, urban heat island, pavements, microclimate.

DESLIGNIFICACIÓN DE BIOMASA PARA SU USO EN BIORREFINERÍA

Pablo Campagna¹, Paula Saires¹, Marisa Falco¹, Melisa Bertero¹

¹Grupo de Investigaciones en Aplicaciones Catalíticas (GIAC). Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica “José Miguel Parera” (INCAPE) (CONICET-UNL) - Colectora Ruta Nac N° 168 km 0, Predio CCT CONICET Santa Fe “Dr. Alberto Cassano”-C.P. 3000 Santa Fe.
Tel. 0342 451-1370 ext. 6101 e-mail: pdcampagna@fiq.unl.edu.ar

RESUMEN: Desde hace muchos años el petróleo es el recurso más utilizado para producir energía y productos químicos de valor agregado. El agotamiento paulatino de este recurso no renovable ha generado un aumento de su costo; además, su utilización masiva es uno de los principales causantes de la acumulación de carbono en la atmósfera y de problemas ambientales. En este contexto, la utilización de fuentes renovables se hace cada vez más necesaria. La biomasa del tipo lignocelulósica es la más abundante en la superficie terrestre, y utilizando procesos de biorrefinería, se pueden sustituir la mayoría de los químicos sintéticos derivados de la industria petroquímica. La biorrefinería consiste en la separación de las fracciones lignina, hemicelulosa y celulosa contenidas en la biomasa y su procesamiento. En este trabajo se realizó la deslignificación de dos biomásas: aserrín de quebracho colorado (*Schinopsis balansae*) y tallos de *Cannabis Sativa L.* Se utilizaron como agentes deslignificantes NaOH 2N y, por otro lado, Solución Etanol/NaOH/Agua (método OrganoSolv) con y sin pretratamiento ácido. Se encontró que el ataque con NaOH elimina la totalidad de la lignina mientras que utilizando el método OrganoSolv bajo las mismas condiciones operativas el grado de deslignificación obtenido es menor.

Palabras clave: Biomasa Lignocelulósica, Biorrefinería, Deslignificación, Lignina, Método Organosolv.

INTRODUCCIÓN

Como se viene haciendo evidente desde hace muchos años, el uso de recursos fósiles como combustibles y/o como materia prima para la industria petroquímica presenta dos grandes problemáticas: en primer lugar, el agotamiento paulatino de los mismos hace que cada vez sea más difícil su extracción, forzando la utilización de tecnología de alta complejidad (Garzón Gordón, 2021). Por otro lado, la quema de estos combustibles a lo largo de la historia produjo la sobreacumulación de carbono, desembocando en el aumento de la temperatura del planeta y generando problemas ambientales asociados (Mondragón, 2021). Por esto, se hace imprescindible impulsar el uso de recursos renovables que suplanten, al menos parcialmente, las fuentes fósiles.

Los carbohidratos y la lignina presentes en la biomasa lignocelulósica son los biopolímeros más abundantes en la superficie terrestre (Sánchez y Cardona, 2006), y mediante procesos de biorrefinería es posible separar sus fracciones lignina, hemicelulosa y celulosa, que luego pueden ser utilizados para la obtención de biocombustibles o para la producción de compuestos químicos de alto valor agregado (Alvira et al., 2010; Chen et al., 2017; Cherubini, 2010; Plaza y Wandzich, 2016). La separación previa de estos biopolímeros mejora el desempeño de las reacciones posteriores necesarias para la obtención de distintos compuestos ya que disminuye la posibilidad de formación de productos recondensados denominados *huminas* (en el caso particular del proceso de producción de ácido levulínico), aumentando la selectividad hacia el producto deseado y desfavoreciendo la formación de residuos (Yoon et al., 2014; Girisuta et al., 2013).

Ciertos estudios identifican los compuestos químicos más prometedores, denominados Chemical Platforms, a partir de los cuales pueden sintetizarse una gran variedad de productos, y que podrían ser de gran utilidad en la matriz industrial del futuro (Werpy y Petersen, 2014; Trigio et al., 2011; Deciancio, 2022); el ácido levulínico es uno de ellos.

En Argentina, se producen grandes cantidades de residuos provenientes de la industria forestal y agrícola que generalmente son utilizados para la obtención de energía mediante la quema directa in-situ o directamente descartados. Estos recursos podrían utilizarse, en cambio, para la obtención de productos químicos de alto valor. El aserrín de quebracho colorado agotado tras su tratamiento con agua caliente para la producción de taninos y los tallos de *Cannabis Sativa L.* descartados durante la cosecha de inflorescencias para la obtención de aceite de cannabis son dos ejemplos de biomasa lignocelulósica residual.

De estudios anteriores, se conoce que el NaOH concentrado y sometido a temperaturas y presiones moderadas es un excelente agente deslignificante (Rezende et al., 2011; Reales et al., 2016). Se han propuesto diversos mecanismos responsables de la deslignificación, que en general se basan en la desestabilización del enlace C-O-C presente en los grupos éter de las ligninas por incorporación de un buen grupo saliente y la posterior formación del anión fenóxido que desemboca en la apertura del anillo y la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, solubles en el solvente utilizado que es generalmente agua (Ding et al., 2021). Mediante una subsiguiente acidificación de la solución, es posible recuperar la lignina por precipitación. Sin embargo, otros métodos señalan que estas ligninas no son de muy buena calidad para su uso en biorefinería, y que utilizando técnicas de deslignificación con bajas concentraciones de álcalis, se obtienen ligninas de mayor calidad (Zhou et al., 2018; Zhao et al., 2017). Una alternativa podría ser un tratamiento en condiciones de pH más suaves, como el método OrganoSolv, que utiliza un compuesto orgánico como agente deslignificante y NaOH en pequeñas concentraciones como catalizador. El compuesto orgánico, generalmente es etanol por su alta disponibilidad, bajo costo y buenas propiedades deslignificantes (Zhou et al., 2018; Zhao et al., 2017). Algunos estudios sugieren que la incorporación de un pretratamiento ácido al proceso OrganoSolv produce la eliminación de las hemicelulosas, logrando desenlazar en parte el entramado polimérico presente en la biomasa y facilitando así el posterior ataque por el agente deslignificante (Eisenhuber et al., 2013; Dagnino et al., 2017), mientras que otros sugieren que las altas temperaturas en etapas de pretratamiento son perjudiciales para la posterior deslignificación (Dagnino et al., 2018).

Este trabajo surge como una primera etapa para la producción de ácido levulínico, en la que se busca eliminar la lignina utilizando el tratamiento más suave y amigable con el medio ambiente posible, y que permita la recuperación de las distintas fracciones que componen la biomasa para lograr un aprovechamiento integral en el proceso de biorrefinería. En particular, el objetivo de este trabajo fue determinar si los tratamientos de deslignificación son eficientes sobre las biomásas aquí utilizadas. Se evaluaron dos tratamientos: a) proceso básico, y b) proceso organosolv (con y sin pre-tratamiento ácido), aplicados a dos biomásas de diferente composición (aserrín de quebracho colorado (*Schinopsis balansae*) y tallos de *Cannabis Sativa L.*). Además, este trabajo busca sentar las bases para trabajos futuros en los que se optimicen los tratamientos aquí aplicados.

METODOLOGÍA

Materias primas y reactivos

El aserrín de quebracho colorado agotado (AQ) fue provisto por industrias forestales de la provincia de Chaco, siendo el residuo de la obtención de taninos.

Los tallos de *Cannabis Sativa L.* (TC) son desechados en el proceso de obtención de aceite de cannabis, ya que para su producción se utilizan sólo las inflorescencias. Los mismos fueron provistos por particulares inscriptos en el *Registro del Programa de Cannabis*, habilitados según el mismo a cultivar plantas de cannabis para uso medicinal (ReProCann, 2021).

El material sólido se molió en molino de martillos para disminuir y homogeneizar el tamaño de partícula, utilizando la fracción retenida entre los tamices de 4 y 20 *Mesh* (tamaño de partícula entre 875 y 4750

μm). Posteriormente se conservó en bolsas herméticas cerradas al vacío. En la Fig. 1 se puede observar el esquema del acondicionamiento aplicado.

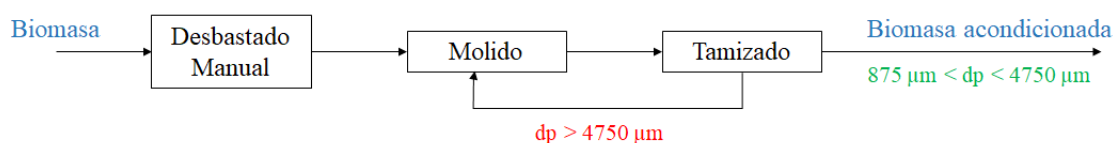


Figura 1: Esquema de acondicionamiento de biomasa.

En cuanto a las soluciones, todas fueron preparadas a partir de reactivos de alta pureza provistos por laboratorios Sigma-Aldrich®. Los reactivos utilizados fueron: Hidróxido de sodio $[\text{NaOH}] > 99,9\%$ p.a. (ACS); Ácido sulfúrico $98 > [\text{H}_2\text{SO}_4] > 95\%$ p.a. (ACS); Alcohol etílico $[\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}] = 96\%$.

Caracterización de sólidos

Las biomásas de partida fueron caracterizadas por análisis proximal. El contenido de humedad, material volátil y ceniza de las biomásas se determinó bajo normas ASTM D3173 (2017), D3175 (2020) y D3174 (2018) respectivamente. El contenido de carbón fijo fue calculado por diferencia. Todas las composiciones elementales (CHON) se determinaron en un equipo CHN628 (LECO).

Además, se determinó el contenido de los biopolímeros de interés Lignina, Hemicelulosa y Celulosa siguiendo el método Ankom basado en la norma ISO 16472:2006, y de proteína bruta según el método AOAC 1998 N° 976.05. En el caso de los TC, también se determinó el contenido extracto etéreo según el método AOAC 1999 N° 920.39 modificado para extractor automatizado, y el contenido de cannabinoides mediante cromatografía gaseosa en un GC-FID HP 6890N equipado con columna ZB35-HT de 30 m de longitud, 0,25 mm de ID y 0,25 μm de espesor de fase. Los cannabinoides fueron extraídos de los tallos siguiendo el procedimiento sugerido por la UNODC (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito) utilizando una mezcla de solventes Metanol/Cloroformo (5:1 v/v), con agitación de 30 min en ultrasonido y centrifugación a 3000 rpm durante 5 min.

Los sólidos deslignificados fueron analizados para determinar su contenido de los biopolímeros Lignina, Hemicelulosa y Celulosa con la misma metodología que para las biomásas materias primas.

Metodología de deslignificación

Todas las reacciones fueron llevadas a cabo en un reactor *Batch* marca PARR modelo 4561, de 300 mL de capacidad y de acero inoxidable AISI 316, provisto con agitación y sistema de calefacción mediante horno a resistencia eléctrica. Para proteger el reactor en las reacciones llevadas a cabo en condiciones de muy alto pH y con alta temperatura, se complementó el reactor con un vaso protector construido en teflón para evitar la fatiga del acero.

Para el ataque básico fuerte (BF) se utilizó solución de NaOH 2N a 160 °C bajo condiciones de presión autógena y con agitación durante 60 minutos, con una proporción de sólidos del 10 % p/v de solución.

Para el ataque organosolv (Soda-Etanol-Agua, SEA) se utilizó una solución con relación 54/46 Etanol/Agua con proporción de sólidos del 10 %p/v de dicha solución. La cantidad de NaOH agregada fue del 8% p/p de sólidos, con agitación y en idénticas condiciones de temperatura y tiempo que el método BF.

El pretratamiento ácido (PA) fue llevado a cabo utilizando solución de H_2SO_4 1 %p/v, a una temperatura de 152 °C bajo presión autógena y con agitación durante 30 minutos.

En todos los casos, los sólidos obtenidos fueron filtrados al vacío con embudo Büchner y papel de filtro, lavados reiteradas veces con agua desionizada, secados en estufa a 60 °C y conservados en envases de polipropileno hasta su posterior análisis.

La lignina fue recuperada del filtrado obtenido de la etapa de deslignificación. El licor se diluyó en proporción 1:2, se calentó hasta 50°C en presencia de agitación constante y se llevó a pH 3 para precipitar la lignina, utilizando una solución de H₂SO₄ al 5% v/v. Posteriormente se filtró al vacío, se lavó con una pequeña cantidad de solución NaOH 0,1N para eliminar el exceso de ácido y se lavó repetidas veces con agua desionizada. Finalmente, se secó en estufa a 60°C durante 24 hs.

En la Fig. 2 se observa el flujograma del procedimiento aplicado.

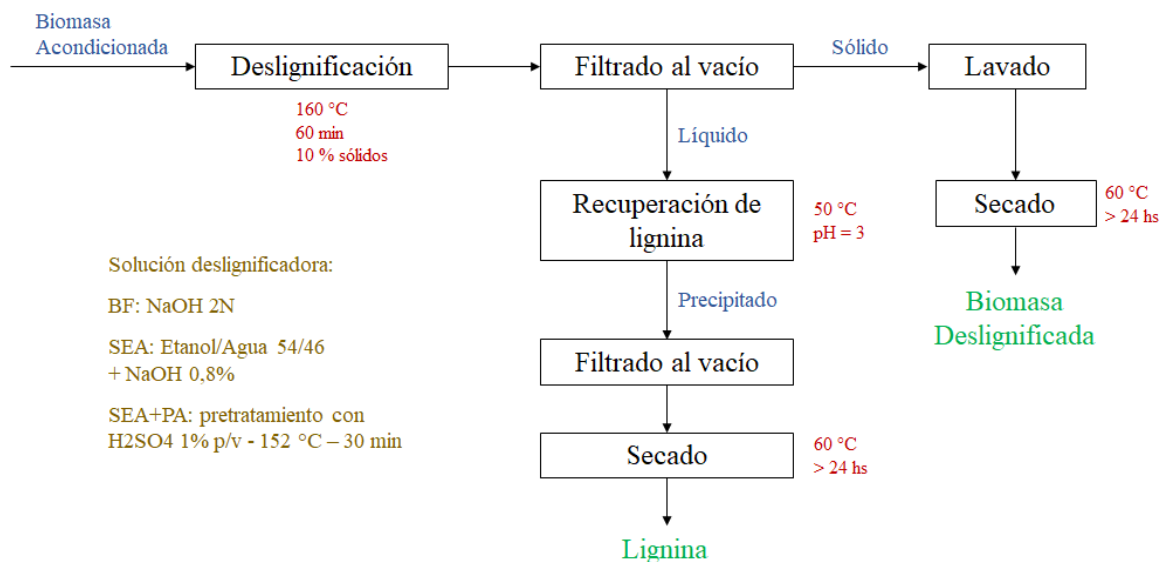


Figura 2: Flujograma de tratamientos aplicados.

Para evaluar la eficiencia de los tratamientos, se consideró el porcentaje de deslignificación obtenido, calculado como la relación entre la cantidad de lignina remanente en la biomasa post-tratamiento frente a la cantidad inicial, como se muestra en la ecuación 1.

$$\%D = \frac{\% L_r}{\% L_0} \quad (1)$$

Donde:

% D = porcentaje de Deslignificación.

% L_r = porcentaje de Lignina residual en biomasa (post-tratamiento).

% L₀ = porcentaje de Lignina presente en biomasa pre-tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se puede apreciar en la Fig. 3, la biomasa original contiene ramas y cortezas de gran tamaño, que no pueden ser tratadas conjuntamente con partículas pequeñas; tras realizar el acondicionamiento se consigue disminuir el tamaño de partícula y tras el tamizado se consigue trabajar con un tamaño de partícula más homogéneo, evitando que el mismo genere influencias sobre el grado de deslignificación.



*Figura 3: Biomosas antes y después del acondicionamiento.
Arriba: AQ sin acondicionar (izquierda) y AQ acondicionado (derecha)
Abajo: TC sin acondicionar (izquierda) y TC acondicionados (derecha)*

Los resultados obtenidos tras la caracterización de las materias primas se observan en la Tabla 1. Podemos ver que los TC contienen un porcentaje de celulosa algo menor al esperado; por ejemplo, otros autores han encontrado contenidos cercanos al 55% cuando se considera el tallo conteniendo tanto la parte fibrosa como el núcleo leñoso (Rehman et al., 2013) y también observan que la parte fibrosa contiene entre el 57-77% y la leñosa entre el 40-48% de celulosa respectivamente (Gümüşkaya et al., 2007). Sin embargo, en nuestro caso, teniendo en cuenta que el contenido celulósico representa aproximadamente un tercio de la masa total, no deja de ser una cantidad importante si se piensa en el aprovechamiento integral de la biomasa, ya que es posible convertirla en productos de alto valor agregado como por ejemplo ácido levulínico.

El contenido de lignina en los TC fue bajo, lo que es favorable para su consideración como materia prima en biorrefinerías, particularmente para procesos como el de producción de ácido levulínico. Sin embargo, es conveniente eliminarla para evitar la formación de productos secundarios no deseados en tratamientos posteriores, ya que puede repolimerizar con azúcares u otras sustancias intermediarias, formando compuestos insolubles indeseados y disminuyendo los rendimientos globales (Girisuta et al., 2017); esto justifica la etapa de deslignificación.

Por otro lado, es de mencionar que la composición del material vegetal suele ser variable; se ha encontrado que en las plantas depende tanto de la especie, como de las variedades dentro de la especie e incluso de su edad a la hora de la cosecha o de la parte de ésta que se esté utilizando (es decir, tallos, hojas, ramas, etc). (Salazar et al., 2016; Vallejos, 2006; Manosalva Barrera, 2020).

Finalmente, se cuantificaron altos contenidos de sustancias no identificadas en el caso de los TC; este hecho cobra importancia debido a que se ha observado en otras experiencias que ciertos componentes inorgánicos presentes en las biomosas de partida afectan negativamente la eficiencia de deslignificación, por lo que se recomienda realizar pretratamientos para eliminarlos (Dagnino et al., 2018). A partir de esto se hace necesario realizar una caracterización más específica en trabajos posteriores, para identificar

estas sustancias y luego evaluar qué influencia tienen sobre otras etapas en la biorefinería y qué métodos son idóneos para eliminarlas, en caso de que sea necesario.

Tabla 1 – Composición química de biomásas

	TC	AQ
Humedad (%p)	9,0	9,4
Análisis proximal (%p base seca)		
Cenizas	7,3	2,1
Material Volátil	74,3	72,7
Carbón Fijo	18,4	25,2
Análisis de composición (%p base seca)		
Celulosa	34,3	39,3
Hemicelulosa	12,4	4,5
Lignina	8,1	39,3
Proteína Bruta	7,9	1,6
Extracto Etéreo	2,1	-
Otros	27,9	13,2
Análisis elemental (%p base seca)		
C	46,4	50,8
H	6,1	5,3
O	-	41,3
N	-	0,4

Para el caso del AQ se encontró que contiene –respecto de los TC- una cantidad menor de hemicelulosas y compuestos no identificados, una cantidad similar de celulosa, y una cantidad mucho mayor de lignina, que equipara al porcentaje de celulosa de casi 40%. Estos valores de composición son cercanos a los esperables para maderas duras; si bien se esperaría que la cantidad de hemicelulosas sea algo mayor y la de ligninas algo menor, es necesario recordar que el AQ utilizado en este trabajo ha sufrido un tratamiento de extracción de taninos, el cual utiliza agua/etanol, que podría haber disuelto parte de las hemicelulosas, disminuyendo así su concentración y aumentando por diferencia la de lignina (Cuervo et al., 2009; Gómez et al., 2012). Es posible intuir entonces que a priori sería muy importante realizar una deslignificación severa sobre el AQ, ya que contiene una cantidad de lignina comparable a la cantidad de celulosa. Como se mencionó anteriormente, sería interesante realizar una caracterización más profunda para conocer las sustancias hasta ahora desconocidas y evaluar si podrían estar influenciando negativamente sobre el tratamiento de deslignificación.

En la Tabla 2 se observa la composición del producto sólido obtenido a partir de cada uno de los tratamientos aplicados, para las dos biomásas. En la Figura 4 se muestran los porcentajes recuperados de cada biopolímero con los distintos tratamientos, en relación al contenido en el sólido original sin tratar. Es para destacar, que con el método básico fuerte (BF) se obtuvo una deslignificación completa con ambas biomásas. En el caso del AQ, el sólido obtenido bajo este método contenía más de 80 %p de celulosa, habiéndose recuperando el 77% de la celulosa contenida en la biomasa original. En el caso de TC, el sólido obtenido por este método estuvo compuesto principalmente por celulosa, pero con un alto contenido de sustancias no identificadas. Asimismo, fue posible conservar la mayor parte de la celulosa originalmente contenida en los tallos.

Tabla 2 - Composición de las biomásas tratados por distintos métodos (%p)

	BF		SEA*	SEA+PA	
	AQ	TC	AQ	AQ	TC
Celulosa	80,56	68,54	52,72	62,97	65,42
Hemicelulosa	2,98	2,67	2,46	4,04	2,57
Lignina	0,00	0,00	35,72	21,78	20,86
Cenizas		13,20			1,70
Otros		15,59			9,45

*En el caso de TC no se aplicó el método SEA dada la baja eficiencia mostrada para AQ.

Utilizando el método SEA (aplicado sólo a AQ) no se obtuvo una buena deslignificación; se eliminó sólo el 37%p de la lignina. Sin embargo, la eficiencia de este proceso mejoró notablemente al aplicar el pretratamiento ácido (SEA+PA), con lo que se logró una deslignificación superior al 71% en el caso del AQ, conservando el 83% de la celulosa contenida originalmente en la biomasa. Algunos estudios sugieren que aumentando el tiempo de reacción se puede lograr una deslignificación completa utilizando este método; por ejemplo, Dagnino et al. aplicaron el proceso OrganoSolv sobre Aserrín de Algarrobo Negro incrementando el porcentaje de deslignificación de 51,3% a 81,0% al modificar el tiempo de reacción de 60 a 100 minutos, condiciones operativas similares a las de este trabajo (Dagnino et al., 2020).

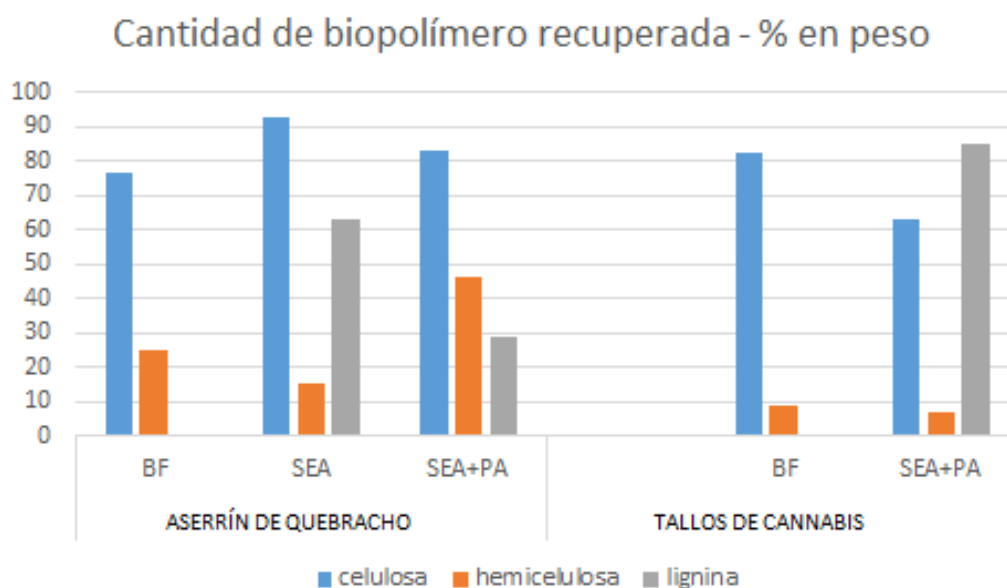


Figura 4 – Porcentaje de biopolímero recuperado en el sólido post tratamiento

En el caso de TC, el tratamiento SEA+PA no produjo la deslignificación esperada; de hecho, bajo esta metodología sólo se eliminó un 15% de la lignina presente, arrastrando consigo 37% de la celulosa presente en la biomasa. El contenido de cenizas y de sustancias no identificadas disminuyó notablemente respecto de la biomasa original, lo que sugiere que el tratamiento estaría disolviendo otras sustancias además de lignina. Es posible que esto se deba a la particular composición de los tallos de cannabis (ver Tabla 1), que contienen altos contenidos de extraíbles en etanol, acetona y agua y que, como ya se ha mencionado, algunos autores apuntan que para favorecer los tratamientos de deslignificación es necesario realizar pretratamientos para eliminar estos extraíbles. Los TC utilizados en este trabajo contenían cannabinoides (0,52%p Δ -9-Tetrahidrocannabinol, 0,1%p Δ -8-Tetrahidrocannabinol, 0,4%p Cannabidiol, 0,2%p Cannabinol y 0,1%p Cannabigerol y 17,5%p (base seca) de extraíbles en éter, lo que podría explicar las observaciones realizadas en la deslignificación con el método SEA+PA.

Si se plantea la producción de ácido levulínico como proceso de interés en la biorrefinería, resulta interesante recuperar la mayor cantidad posible de celulosa contenida originalmente en la biomasa durante el proceso de deslignificación, y en lo posible, conservar también las hemicelulosas, dado que a partir de las xilosas contenidas en ellas es posible obtener furfural, que luego puede ser transformado a alcohol furfurílico y finalmente a ácido levulínico (Hayes et al., 2005; Chen et al., 2017). Es para destacar que el método SEA+PA fue el que logró conservar intactas la mayor parte de las hemicelulosas contenidas en AQ, mientras que, para TC, el método BF fue el que mostró este efecto, además de ser el que logró un mayor grado de deslignificación.

Si bien con el método BF se obtienen mayor eficiencia de deslignificación con ambas biomásas, es el tratamiento que utiliza condiciones operativas más severas; en particular, el alto pH obliga a trabajar con materiales especiales para el diseño de equipos. El método SEA+PA promete ser una opción viable si se desea trabajar bajo condiciones más suaves, aunque esto implicaría un tiempo de reacción mayor, aumentando el consumo energético.

En base a estas observaciones, es interesante plantear alternativas para optimizar ambos métodos de deslignificación. En el caso del método BF, se podría evaluar si disminuyendo la severidad de las condiciones operativas, es posible obtener resultados similares en cuanto al grado de deslignificación. En el caso del método SEA+PA, evaluar si aumentando el tiempo de reacción o modificando alguna otra variable operativa se mejoran los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

Se aplicaron dos métodos de deslignificación a Aserrín de Quebracho colorado (AQ) y Tallos de Cannabis Sativa L. (TC). El más efectivo para eliminar la lignina resultó ser el método Básico Fuerte (método BF), que utiliza NaOH 2N a 160 °C durante 60 minutos y logra eliminar el 100% de la lignina, conservando el 77% de la celulosa para el caso del AQ y el 82% para el caso de los TC. Se probó también un método que funciona a un pH más neutro: emplea una solución NaOH/Etanol/Agua con proporción Etanol/Agua 54/46 p/p y NaOH 0,2 N (método SEA). Este método no fue lo suficientemente efectivo, pero su eficiencia se logró mejorar notablemente realizando un pretratamiento con H₂SO₄ a 152 °C durante 30 minutos (método SEA+PA). De esta manera se logró eliminar el 71% de la lignina conservando el 83 % de la celulosa para el caso del AQ. Para el caso de los TC, la eficiencia de este método fue muy baja, dado que sólo el 15% de la lignina fue eliminada, lo que podría deberse a la presencia de sustancias que interfieren en el tratamiento de deslignificación. Es de interés para futuros trabajos realizar una caracterización más completa de los TC e implementar un pretratamiento extra para eliminar previamente las sustancias indeseables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado durante los años 2021 y 2022, utilizando fondos provenientes de diferentes fuentes de financiamiento: de Agencia I+D+i (PICT 2019-2621, PICT 2019-3391), UNL (CAI+D 2020 PI Tipo II 50620190100177LI) y CONICET (PIP 2021-11220200103146CO).

NOMENCLATURA

AQ – Aserrín de Quebracho Colorado (*Schinopsis balansae*).

BF – Tratamiento básico Fuerte

SEA – Tratamiento Soda/Etanol/Agua.

SEA+PA – Tratamiento Soda/Etanol/Agua con Pretratamiento Ácido.

TC – Tallos de Cannabis Sativa L.

REFERENCIAS

- Alvira P., Tomás-Pejó E., Ballesteros M. J., Negro M. J., (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresource Technology*, 101, 4851–4861, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>.
- Chen S. S., Maneerung T., Tsang D. C. W., Sik Ok W., Wang C. H.. (2017). Valorization of biomass to hydroxymethylfurfural, levulinic acid, and fatty acid methyl ester by heterogeneous catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 328, 246-273. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.020>.
- Cherubini F., (2010). The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51, 1412–1421, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>.
- Cuervo L., Folch J. L., Quiroz R. E. (2009). Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol. *Centro de Investigación en Biotecnología, UAEM, BioTecnología*, 13, 3.
- Dagnino E. P., Felissia F.E., Chamorro E., Area M.C., (2017). Optimization of the soda-ethanol delignification stage for arice husk biorefinery. *Industrial Crops and Products*, 97, 156–165, <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.016>.
- Dagnino E. P., Ruiz C., Chamorro E., (2018). Ensayos preliminares de deslignificación de aserrín de algarrobo negro, en vistas a la producción eficiente de azúcares fermentables. *AVERMA* 22, 61–66 <http://www.exporenovables.com.ar/2018/descargas/actas/asades-tema-6-131.pdf>.
- Dagnino E. P., Chiappero L. R., Nivolau V. V., Chamorro E. R. (2020). Separation process optimisation and characterisation of lignin from black carob treesawdust into a biorefinery. *Chemical Engineering Research and Design*, 155, 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.12.027>.
- Deciancio M., Siegel K. M. (2022). Creando condiciones para el desarrollo de la bioeconomía en la Argentina: El papel de las políticas estatales en biotecnología y biocombustibles (1990-2022). *Revista Estado y Políticas Públicas*, 19, 225-248.
- Ding N., Liu H., Sun Y., Tang X., Lei T., Xu F., Zeng X., Lin L. (2021). Lignin degradation in cooking with active oxygen and solid Alkali process: A mechanism study. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123984. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123984>.
- Eisenhuber K., Krennhuber K., Steinmüller V., Jäger A. (2013). Comparison of different pre-treatment methods for separating hemicellulose from straw during lignocellulose bioethanol production. *Ener. Procedia* 40, 172–181, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.021>.
- Garzón Gordón, A. J. (2021). El mercado del petróleo en el siglo XXI. Factores determinantes y efectos económicos. Programa de Doctorado en Ciencias Económicas, Empresariales y Sociales de la Universidad de Sevilla.
- Girisuta B., Dussan K., Haverty D., Leahy J. J., Hayes M. H. B. (2013). A kinetic study of acid catalysed hydrolysis of sugar cane bagasse to levulinic acid. *Chemical Engineering Journal*, 217, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.094>.
- Girisuta B., Jan Heeres H., (2017). Production of Platform Chemicals from Sustainable Resources, Biofuels and Biorefineries. *Springer Nature (Singapore, Japón)*, 7, 143-169.
- Gómez E. A., Rios L. A., Peña J. D. (2012). Madera, un Potencial Material Lignocelulósico para la Producción de Biocombustibles en Colombia. *Información Tecnológica*, 23, 73-86. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000600009>.
- Gümüşkaya E., Usta M., Balaban M., (2007). Carbohydrate components and crystalline structure of organosolv hemp (*Cannabis sativa* L.) bast fibers pulp. *Bioresource Technology*, 98, 491–497.
- Hayes D. J., Fitzpatrick S., Hayes M. H. B., Ross J. R. H. (2005). The Biofine Process – Production of Levulinic Acid, Furfural, and Formic Acid from Lignocellulosic Feedstocks. *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. <https://doi.org/10.1002/9783527619849.ch7>.
- Manosalva Barrera J. C., Dávila J. A., Quintero J. A. (2020). Estudio holístico de la producción de papel a partir de cáñamo industrial en el contexto colombiano. *Revista Mutis*, 10,2. <https://doi.org/10.21789/22561498.1721>.
- Mondragón, F. (2021). Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45, 176. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1364>.

- Plaza G. A. y Wandzich W., (2016). Biorefineries-new green strategy for development of smart and innovative industry. *Management Systems in Production Engineering*. 3, 150–155, <http://dx.doi.org/10.2478/mspe-02-03-2016>.
- Reales J. G., Castaño H. I., Zapata J. E. (2016). Evaluación de Tres Métodos de Pretratamiento Químico sobre la Deslignificación de Tallos de Yuca. *SciELO Analytics*, 27, 11-22. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000300003>.
- Rehman M.S.U., Rashid N., Saif A., Mahmood T., Han J.-I. (2013). Potential of bioenergy production from industrial hemp (*Cannabis sativa*): pakistan perspective. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 18, 154–164.
- ReProCann (2021). Registro del Programa de Cannabis. Ministerio de Salud de la República Argentina. <https://www.argentina.gob.ar/salud/cannabis-medicinal/reprocann>.
- Rezende C. A., Aparecida de Lima M., Mezeiro P., de Azevedo E. R., García W., Polikarpov I. (2011). Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility. *Biotechnology for Biofuels*, 54. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-54>.
- Salazar J. A. H., Hidalgo F. A. Hernández G. C. (2016). Composición lignocelulósica de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. leiophylla* Schlecht. & Cham. y *P. herrerae* Martínez. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7, 34.
- Sánchez Ó. J. y Cardona C. A. (2006). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 99, 5270-5295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.013>.
- Trigio E. J., Mentaberry A., Cap E. J., Zelada A., Villarreal F. (2011). El potencial de la Bioeconomía y las Biorrefinerías en la Argentina. Ministerio de Ciencia, Técnica e Innovación Productiva, Presidencia de la Nación Argentina.
- Vallejos M. E. (2006). Aprovechamiento Integral del Cannabis Sativa como Material de Refuerzo/Carga del Polipropileno. Tesis Doctoral en Ciencia y Tecnología en las Industrias Textiles y Papeleras, Universidad de Girona.
- Werpy T., Petersen G. (Eds) (2004). Top Value Added Chemicals From Biomass Volume I: Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. PNNL and NREL (USA).
- Yoon S.Y., Shin S.J., (2014). The effect of hemicelluloses and lignin on acid hydrolysis of cellulose. *Energy* 77, 19–24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.104>.
- Zhao X., Li S., Wu R., Liu D. (2017). Organosolv fractionating pre-treatment of lignocellulosic biomass for efficient enzymatic saccharification: chemistry, kinetics, and substrate structures. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11, 567-590. <https://doi.org/10.1002/bbb.1768>.
- Zhou Z., Lei F., Li P., Jiang J. (2018). Lignocellulosic biomass to biofuels and biochemicals: a comprehensive review with a focus on ethanol organosolv pretreatment technology. *Biotechnol. Bioeng.* 115, 2683–2702. <http://dx.doi.org/10.1002/bit.26788>.

DELIGNIFICATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS FOR USE IN BIOREFINERY

ABSTRACT: For many years, oil has been the most used resource to produce energy and value-added chemicals. The gradual depletion of this non-renewable resource has generated an increase in its cost and its massive use is one of the main causes of carbon accumulation in the atmosphere and other associated environmental problems. In this context, the use of renewable sources is becoming increasingly necessary. Lignocellulosic biomass is the most abundant organic compound on the earth's surface, and using biorefinery processes can replace most of the synthetic chemicals derived from the petrochemical industry. The biorefinery consists of the separation of the lignin, hemicellulose and cellulose fractions contained in the biomass. In this work, delignification reactions were carried out on Willowleaf Red Quebracho Sawdust (*Schinopsis balansae*) and *Cannabis Sativa L.* Stems using 2N NaOH or Ethanol/NaOH/Water solution as delignifying agent (OrganoSolv method) and evaluating for the latter the influence of a acid pretreatment step. It was found that the NaOH attack removes 100% of the Lignin, while using the OrganoSolv method under the same operating conditions a lower degree of delignification is obtained.

Keywords: Lignocellulosic Biomass, Biorefinery, Delignification, Lignin, Organosolv.

CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS DE SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES

Paula Saires, Melisa Bertero, Ulises Sedran

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica “José Miguel Parera” INCAPE (CONICET-UNL). Colectora Ruta Nacional N° 168 Km 0, S3000AOJ, Santa Fe, Argentina.
Tel (54) (342) 4511370, interno 6112. E mail: psaires@fiq.unl.edu.ar

RESUMEN: Se estudió la pirólisis de subproductos lignocelulósicos agroindustriales (cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar) y se caracterizaron los productos obtenidos en cuanto a su composición y sus propiedades fisicoquímicas, con el objetivo de verificar su potencial de utilización en diversas aplicaciones. En los tars se observaron altos contenidos de C (entre 60 y 70 %p) y de O (entre 20 y 30 %p) y se confirmó la presencia de gran cantidad de compuestos aromáticos y de protones alifáticos (RMN), de alcoholes y fenoles (FTIR). El contenido de O en el material sólido se redujo alrededor de 75 % (chars respecto de la biomasa), y en él se concentraron los componentes inorgánicos; particularmente, el char de cáscara de arroz contenía 51 % de cenizas cuyo componente principal fue la sílice (90 %). La fracción acuosa de ambos bio-oils estuvo compuesta principalmente por ácidos, fenoles, cetonas y furanos, y los gases presentaron poderes caloríficos tales que permiten su uso como combustible. En base a estos resultados es posible establecer opciones de uso y valorización para todos productos generados en la pirólisis de los subproductos agroindustriales estudiados.

Palabras clave: biomasa, pirólisis, tar, char, energía, productos químicos.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía en Argentina depende fundamentalmente de combustibles fósiles (especialmente gas natural y petróleo). La disminución de la producción de estos recursos y el aumento de la conciencia ambiental, propician un escenario donde las energías renovables juegan un rol esencial. La biomasa lignocelulósica es uno de los recursos a considerar, que resulta prometedor debido a su neutralidad en el ciclo del dióxido de carbono, su amplia disponibilidad y abundancia, distribución, renovabilidad, sostenibilidad y versatilidad. En los últimos años, la utilización de residuos lignocelulósicos urbanos, forestales y agroindustriales para la generación de energía, combustibles y materia prima para la industria química, ha recibido mucha atención, ya que este tipo de biomasa no compromete el suministro de alimentos (Lim et al., 2012). Esto puede lograrse vía procesos termoquímicos, como la pirólisis y la gasificación, entre otros.

En la pirólisis se generan tres corrientes de productos útiles mediante la degradación térmica de la biomasa en ausencia o con cantidades limitadas de oxígeno: líquidos, denominados bio-oils, compuestos por dos fracciones (acuosa y alquitranosa; esta última denominada tar), gaseosos y sólidos (char, compuesto básicamente por carbón y cenizas). La producción y composición de tales corrientes dependen, principalmente, de los parámetros operativos del proceso y de la biomasa utilizada como materia prima. La pirólisis rápida (con tiempos de contacto de pocos segundos) maximiza gases o líquidos (Mohan et al., 2006): a 425-500°C se puede alcanzar 75 % de líquidos, mientras a 700 °C se maximizan gases.

La pirólisis convencional, a 500-600°C, con tiempos de contacto más prolongados, brinda proporciones similares de gases, líquidos y char.

Los bio-oils y sus fracciones encuentran numerosos usos y posibilidades de valorización: son combustibles potenciales para motores diesel, turbinas y calderas, y materias primas para obtener hidrocarburos en el rango de la gasolina por medio de procesos propios de las refinerías de petróleo (Pujro et al., 2021). El tar resulta más apropiado para su aprovechamiento que la fracción acuosa, debido a su notablemente más bajo contenido de agua y su menor acidez; podría emplearse en reemplazo de polímeros para la obtención de microesferas soporte de agroquímicos y biocidas (Taverna et al., 2022), como fuente alternativa de fenol para resinas de fenol-formaldehído, en la preparación de mezclas asfálticas más resistentes al envejecimiento y a la deformación elástica, o para la producción de fibras de carbono (Park et al., 2022). Sin embargo, la complejidad de la mezcla dificulta mucho su caracterización, por lo que las opciones de valorización del mismo no han sido exploradas aún de manera exhaustiva (Wang et al., 2014).

Los chars de pirólisis está compuesto principalmente por carbono y oxígeno, por lo que tienen alto contenido de energía y pueden usarse en diversas aplicaciones, tales como generación de energía térmica (para el propio proceso de pirólisis o para otros), preparación de carbón activado (con numerosas aplicaciones), en la mejora de la fertilidad del suelo y en filtración y adsorción de contaminantes, entre otros (Cha et al., 2016). Considerar apropiadamente todas estas aplicaciones requiere la comprensión de los recientes avances en el conocimiento de las estructuras moleculares del biochar (Xiao et al., 2018).

En este sentido, resulta imprescindible desarrollar metodologías adecuadas que permitan conocer la composición y propiedades de los productos de pirólisis, de modo de optimizar opciones de valorización dentro de un esquema de biorrefinería, así como evaluar sus rendimientos y la variación en su composición en función de la biomasa materia prima y las relaciones estructura-aplicación. Bajo dicho enfoque, en este trabajo se obtuvieron y caracterizaron todas las corrientes de productos obtenidas en la pirólisis de dos biomásas diferentes (cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar), utilizando diversas técnicas analíticas.

METODOLOGÍA

La cáscara de arroz (CA) (*Oryza sativa L.*) y el bagazo de caña de azúcar (BCA) (*Saccharum officinarum L.*), ambos supproductos lignocelulósicos agroindustriales, fueron provistos por un molino arrocero de la provincia de Santa Fe y un ingenio azucarero de la provincia de Tucumán, respectivamente. La CA presentó tamaños efectivos de partículas entre 1,7 y 2,4 mm y el BCA fue molido y tamizado a tamaños de partícula entre 0,60 y 0,85 mm. Ambas fueron secadas en estufa a 100 °C por 18 hs.

Los experimentos de pirólisis rápida se llevaron a cabo en un reactor batch de lecho fijo a 500 °C, con flujo de nitrógeno de 90 ml min⁻¹ y una duración de 30 min, de acuerdo a la metodología reportada en Rada Arias et al. (2019). Los líquidos se colectaron en un condensador y fueron separados por centrifugación en sus fases acuosa y alquitranosa (tar); los gases fueron muestreados utilizando una bolsa Tedlar, y los sólidos (char) quedaron contenidos dentro del reactor al finalizar el experimento.

La composición de las biomásas fue determinada en cuanto a su material lignocelulósico a partir de los valores Fibra Detergente Neutro (FDNa) (ISO 16472:2006), Fibra Detergente Ácido (FDAs) (ISO 13906:2008), y de Lignina Detergente Ácido (LDA). El contenido de humedad, material volátil y cenizas de las biomásas y de los chars se determinó bajo normas ASTM D3173, D3175 y D3174, respectivamente. El contenido de carbón fijo fue calculado por diferencia. Todas las composiciones elementales se determinaron en un equipo CHN628 (LECO) y el poder calorífico superior (PCS) de sólidos y líquidos con la fórmula de Dulong. La composición de gases se determinó por GC en un equipo HP 6890N con detector TCD con columna GS CarbonPlot, y el poder calorífico inferior (PCI) fue calculado a partir de dichos datos. El contenido de agua en los productos líquidos se determinó con titulación Karl-Fischer (IRAM 21320) y las densidades mediante medición volumen-masa.

La composición de los chars se estudió utilizando un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X, por dispersión en energía, Modelo EDX-720, marca Shimadzu, donde las muestras sólidas fueron

montadas en un portamuestra con ventana de polipropileno y recibieron tratamiento de secado en vacío, realizándose scannings en el rango Sodio (Na) – Uranio (U).

Los tars fueron analizados mediante RMN, para lo que se utilizó un espectrómetro Multinuclear Bruker Avance de 300 MHz, donde se midió ^1H RMN a 25 °C en CDCl_3 . También se realizaron ensayos de FTIR, en un espectrómetro Shimadzu FTIR Prestige-21 equipado con un detector de alta sensibilidad (400-4000 cm^{-1} , 80 scans). Las muestras se prepararon como pastillas (aproximadamente 1% de muestra en KBr).

Todos los experimentos se realizaron por duplicado, con una variación máxima de cinco puntos porcentuales. En cuanto a las determinaciones analíticas, la variación fue mucho menor (menos de 2 puntos porcentuales).

RESULTADOS

Composición de las biomásas

En la Tabla 1 se presentan las composiciones de las biomásas; ambas presentaron contenidos de humedad adecuados para su uso en procesos termoquímicos. La composición elemental y el contenido de material lignocelulósico están en rangos típicos (Alvarez et al., 2014; Al Arni, 2018). Asimismo, se observaron algunas diferencias significativas entre los materiales: el BCA presentó mayor proporción de sólidos volátiles y de holocelulosa (celulosa más hemicelulosa) que la CA, que muestra un alto contenido de cenizas. Ambas biomásas presentaron bajos contenidos de lignina respecto de los típicos aserrines de madera utilizados como materia prima en la pirólisis (lignina entre 20 y 28 %p/p, (Al Arni, 2018)).

Tabla 1: Composición de las biomásas

	Bagazo de Caña de Azúcar	Cáscara de Arroz
Humedad (%p)	7,4	8,6
Análisis proximal (%p, base seca)		
Cenizas	3,5	23,1
Sólidos volátiles	79,9	60,9
Carbón fijo	16,6	15,9
Composición lignocelulósica (%p, base seca)		
Celulosa	44,4	37,9
Hemicelulosa	32,7	18,0
Lignina	11,1	17,3
Otros	8,3	3,8
Análisis elemental (%p, base seca)		
C	46,8	39,2
H	5,3	4,4
O	44,1	32,9
N	0,3	0,3
PCS (MJ kg^{-1})	15,5	13,7

Rendimientos de la pirólisis

En la pirólisis de las biomásas estudiadas se obtuvieron tres tipos de productos: sólidos, gaseosos y líquidos; estos últimos compuestos por dos fracciones, una acuosa y otra alquitranosa (denominada tar). En la Tabla 2 se presentan los rendimientos para ambas biomásas, donde se observa que la CA produjo un mayor porcentaje de char que el BCA, en consistencia con su alto contenido de cenizas.

Tabla 2: Rendimientos en la pirólisis y composición de los gases

	Bagazo de Caña de Azúcar	Cáscara de Arroz
Rendimientos (%p)		
Char	25,6	42,9
Líquidos	44,2	35,4
Tar	5,1	4,6
F. Acuosa	39,1	30,9
Gases	30,2	21,6
Composición de los gases (%p)		
H₂	2,1	1,2
CO	19,4	23,1
CH₄	19,6	15,0
CO₂	23,4	26,6
N₂	35,5	34,1
PCI (MJ m⁻³)	8,9	7,7

Asimismo, en ambos casos el rendimiento a char fueron superiores a los obtenidos con residuos madereros (Bertero et al., 2012), lo cual es atribuido principalmente al mayor contenido de iones inorgánicos en estos materiales, favoreciendo las reacciones de carbonización (Di Blasi et al., 1999). El BCA generó más líquidos (siendo más del 80% correspondiente a fase acuosa) que la CA, lo que es acorde a su alto contenido de holocelulosa.

Otros autores reportaron diferentes rendimientos de la pirólisis de estas biomásas en función del tipo de reactor utilizado y las condiciones operativas. Por ejemplo, Alvarez et al., (2014) estudiaron la pirólisis rápida de cáscara de arroz a temperaturas entre 400 y 600 °C en un equipo continuo a escala banco equipado con un reactor de lecho cónico con remoción continua del char, y obtuvieron rendimientos de líquidos entre 67 y 71 %p/p, de gases entre 1 y 9 %p/p, y char entre 24 y 32 %p/p.

La fracción gaseosa estuvo compuesta principalmente por óxidos de carbono (CO y CO₂) y metano (Tabla 2), además del nitrógeno utilizado para inertizar los experimentos de pirólisis. Se obtuvieron valores bajos de hidrógeno, aproximados a los informados por otros autores en la pirólisis de las mismas biomásas (Alvarez et al., 2014). Las proporciones de CO y CO₂ fueron similares para ambas biomásas, lo que sugiere que las vías de desoxigenación mediante reacciones de decarbonilación y descarboxilación presentan cierta equivalencia. Algunos autores concluyeron que por debajo de 450°C prevalecen las reacciones de descarboxilación (dando mayor concentración de CO₂ en los gases), mientras que, por encima de dicha temperatura, prevalecen las de decarbonilación (dando mayor concentración de CO). Sin embargo, estas observaciones fueron realizadas en reactores con diferente metodología de operación (con remoción continua del char durante la pirólisis (Alvarez et al., 2014) y de lecho fluidizado (Chen et al., 2011)), que la utilizada en el presente trabajo. El char actúa como catalizador de reacciones secundarias de craqueo de los compuestos volátiles que se generan durante la pirólisis, para producir otros más livianos, entre ellos, metano, cuya concentración en los gases en estos experimentos fue mucho más alta que las observadas por Alvarez et al. (2014), quienes reportaron menos de 5 %v/v. Adicionalmente, el char cataliza reacciones secundarias de condensación y polimerización de los compuestos volátiles para producir compuestos de alto peso molecular.

El gas producido durante la pirólisis de ambas biomásas presentó un bajo poder calorífico (Tabla 2) debido a dilución con el nitrógeno del experimento.

Composición y propiedades de la fracción acuosa del bio-oil

Los compuestos de la fracción acuosa del bio-oil se agruparon en la Tabla 3 de acuerdo a los grupos funcionales de mayor relevancia. La presencia de muchos de estos compuestos oxigenados (como

fenoles, ciclopentenonas, aldehídos, ácidos carboxílicos y monosacáridos; en particular los heterocíclicos (furanos y piranos)) hacen que el bio-oil sea inestable durante el almacenamiento, y su alto contenido de agua es responsable de la inmiscibilidad con hidrocarburos y del bajo poder calorífico (Bridgwater, 2012). El pH de las fracciones acuosas fue bajo debido al alto contenido de ácidos.

Tabla 3: Composición y propiedades de la fracción acuosa del bio-oil

	Bagazo de caña de azúcar	Cáscara de arroz
Composición química (%p, base seca)		
Ácidos	43,2	30,1
Ésteres	1,0	0,9
Aldehídos	7,7	8,3
Cetonas	19,1	17,2
Éteres	0,9	0,9
Compuestos heterocíclicos	2,9	6,6
Alcoholes y monosacáridos	4,2	3,7
Fenoles	12,6	15,0
Hidrocarburos	0,3	0,2
Desconocidos	8,2	16,9
Propiedades fisicoquímicas		
Agua (%p)	52,9	77,7
pH	3	3
Densidad (g mL⁻¹)	1,06	1,05

La fracción acuosa del BCA presentó mayor contenido de ácidos y monosacáridos (levoglucosano) que la CA, en consistencia con su mayor contenido de holocelulosa. Mientras, la fracción de CA presentó mayor proporción de furanos, aldehídos y fenoles (esto último, debido a su mayor contenido de lignina). El ácido mayoritario fue el acético (36,5 %p/p en BCA y 24,3 %p/p en CA), seguido por el fórmico, el 2-metil-propanoico, el propilglutárico y el 4-hidroxi-3-metoxi-benzoico. El principal aldehído fue cinamaldehído (5,0 %p/p en BCA y 6,8 %p/p en CA); el éster predominante fue 2-butanoato de vinilo en ambos casos. Las cetonas más importantes fueron 2-pentanona (7,4 %p/p en BCA y 4,8 %p/p en CA), y dentro de las cetonas cíclicas, la 2-ciclopentenona y la 2-hidroxi-3-metil-ciclopentenona (representando alrededor de 4 %p/p en conjunto en ambas fracciones acuosas). Los heterocíclicos estuvieron representados por furanos (furfural, 2-furanmetanol, 2-acetilfuran, y 5-(hidroximetil)-furfural) y piranos (3,4-dihidro-2H-pirano). Los fenoles más importantes fueron fenol, fenoles alquilados (metil, dimetil y trimetilfenoles) y catecoles, todos ellos representando 5,2 %p/p en BCA y 6,0 %p/p en CA; y guaiacoles (6,0 %p/p en BCA y 8,8 %p/p en CA), y siringoles (1,3 %p/p en BCA y 0,3 %p/p en CA).

Estas diferencias pueden explicarse en función de la composición de las ligninas de ambas biomásas, las cuales están compuestas por unidades G (guaiacilo), H (cumarilo) y S (siringilo); en la CA predominan las unidades G, con relación H:G:S de 7:81:12 (Rosado et al., 2021), mientras que la lignina de BCA está formada principalmente por unidades S, con relación H:G:S de 2:38:60 (Bezerra y Ragauskas, 2016), impactando en la proporción de guaiacoles y siringoles de la fracción acuosa. El único alcohol observado fue metanol (4,2 %p/p en BCA y 2,2 %p/p en CA). La mayoría de los compuestos no identificados presentaron pesos moleculares inferiores a 130 g mol⁻¹ (63 %p/p en BCA y 77 %p/p en CA).

Composición y propiedades del tar

En la Tabla 4 se presentan las composiciones de los tars obtenidos en la pirólisis de ambas biomásas; estas fracciones líquidas presentaron un mayor contenido de C y menor O en comparación con las

respectivas biomásas de origen, por lo que su PCS también fue superior (Tabla 1). Generalmente, los PCS de los bio-oils son 50 % más bajos que los de los combustibles fósiles (por ejemplo, el PCS del fuel oil, que habitualmente se utiliza como combustible en calderas y hornos industriales, es 40 MJ kg⁻¹). Los tars fueron ligeramente más densos que las respectivas fracciones acuosas del bio-oil (Tabla 3), debido a su bajo contenido de agua y al mayor peso molecular de sus componentes.

Tabla 4: Composición y propiedades de los tars

	Bagazo de Caña de Azúcar	Cáscara de Arroz
Humedad (%p)	18,5	12,1
Análisis elemental (%p, base seca)		
C	59,9	71,2
H	6,3	5,6
O	33,2	20,5
N	0,6	2,6
PCS (MJ kg⁻¹)	23,4	28,6
Densidad (g mL⁻¹)	1,2	1,2

En la Figura 1 se presentan los espectros ¹H RMN de los tars obtenidos en la pirólisis de las biomásas y en la Tabla 5 los valores integrales de las regiones seleccionadas de los espectros en forma de porcentaje. Los límites de integración para cada tipo de hidrógeno en el espectro fueron seleccionados utilizando la clasificación realizada por Mullen et al. (2009).

Ambos tars mostraron composiciones similares, presentando la mayor resonancia de átomos de hidrógeno en el rango de 1,5 a 3,0 ppm, la cual representa protones en átomos de carbono alifáticos que pueden estar unidos a un doble enlace C=C (aromático u olefínico) o a dos enlaces de un heteroátomo. En el caso del tar de CA, se considera que estos carbonos α están unidos a aromáticos dada la notable cantidad de hidrógeno en la región de 6,0 a 8,5 ppm, lo cual sugiere que las sustituciones en los anillos aromáticos ocurren principalmente a través de enlaces C-C (por ejemplo, grupos metilos) y que este tar contiene mayor proporción de anillos de benceno o menos sustituyentes en los anillos bencénicos que el tar de BCA. Este último tar presentó mayor contenido de hidrógeno formando parte de grupos funcionales alifáticos que están unidos a átomos de carbono en posición β o γ de un anillo aromático o de un doble o triple enlace (región más alta del espectro, de 0,5 a 1,5 ppm); por lo tanto, contiene mayor proporción de enlaces alifáticos largos entre anillos de benceno o grupos terminales de cadena alifáticos, etilo o más largos, fuera de un anillo aromático (Mullen y Boateng, 2011) que el tar de CA.

Tabla 5: Distribución porcentual de H (a partir de ¹H RMN) en los tar de pirólisis

Desplazamiento químico (ppm)	Asignación	BCA	CA
8,5 – 6,0	Protones enlazados directamente a un anillo aromático (bencénico o con heteroátomos O y N)	14,2	29,4
6,0 – 4,4	Protones en átomos de carbono de grupos metoxilo y protones en moléculas similares a los carbohidratos	2,6	1,9
4,4 – 3,0	Protones en átomos de carbono junto a un alcohol alifático o éter, o un grupo metileno que une dos anillos aromáticos	11,9	10,3
3,0 – 1,5	Protones alifáticos en carbono α a un anillo aromático o insaturación o heteroátomo	52,9	43,3
1,5 – 0,5	Protones alifáticos en grupos metilo o metileno β o γ a un anillo aromático o insaturación	18,5	15,1

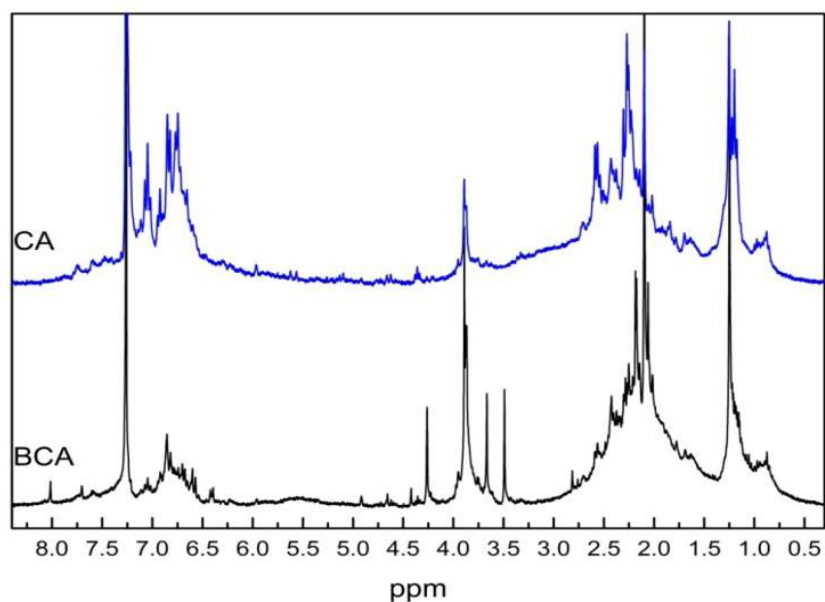


Figura 1: Espectro RMN H^+ del tar de cáscara de arroz (CA) y de bagazo de caña de azúcar (BCA)

Por último, ambos tars presentaron alrededor del 11 % de hidrógeno de éteres aromáticos (región del espectro entre 4,4 y 6,0 ppm), correspondiente principalmente a metoxifenoles derivados de la lignina, tales como guaiacol, siringol y sus derivados. También puede corresponder a átomos de hidrógeno de moléculas similares a los carbohidratos u olefinas (Varma y Mondal, 2017), lo que podría representar a moléculas como levoglucosano, en consistencia con lo observado en FTIR.

En la Figura 2 se muestran los espectros FTIR correspondientes a los tars de pirólisis de las biomásas estudiadas. Este análisis permite observar los principales grupos funcionales presentes asociados a los componentes del tar. En ambos casos se observó una amplia señal alrededor de 3750 y 3250 cm^{-1} relacionada con el estiramiento del enlace O-H unido a un carbono en grupos alcoholes (alcoholes alifáticos y fenoles) (Vitolo et al., 2001), así como también al aporte de los grupos OH de los ácidos carboxílicos (Kanaujia et al., 2013).

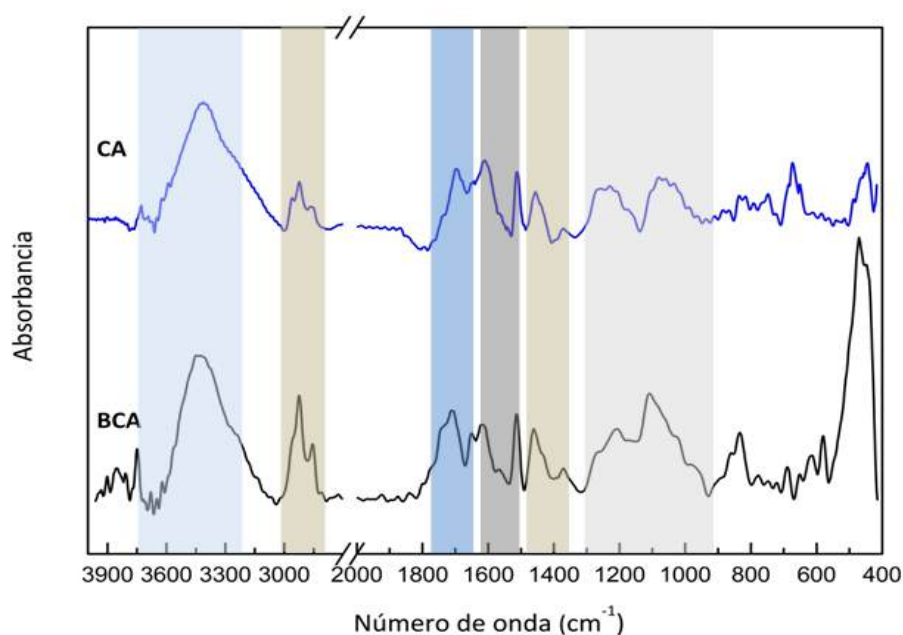


Figura 2: Espectros FTIR del tar de cáscara de arroz (CA) y de bagazo de caña de azúcar (BCA)

Se observó la presencia de alcanos, indicada por el pico de absorbancia de las vibraciones de C–H entre 3000 y 2800 cm^{-1} y por las bandas de 1470 y 1350 cm^{-1} debidas a la flexión de C–H (Biswas et al., 2017). También se encontraron señales destacables en las bandas a 1750-1650 cm^{-1} que se atribuyen al estiramiento del grupo carbonilo C=O, indicando la presencia de cetonas, aldehídos y ácidos carboxílicos. Estas señales son consistentes con las observadas en RMN en la región de 1,5 a 3,0 ppm, indicadoras de protones alifáticos en carbonos α de un anillo aromático o de un doble o triple enlace. La región alrededor de 1606-1515 cm^{-1} corresponde a vibración del esqueleto aromático (Wang et al., 2014) y en ambos tars se presentan marcadas señales en esta zona.

Los picos que se observan entre 1300 y 900 cm^{-1} corresponden a absorciones debidas a las vibraciones C–O de componentes carbonílicos (es decir, alcoholes, ésteres, ácidos carboxílicos o éteres). Además, ambos tars mostraron la vibración de estiramiento del enlace C–O alrededor de 1033 cm^{-1} , lo cual indica la presencia de alcoholes alifáticos y alicíclicos de anillos de ocho miembros, puntualmente levoglucosano; este compuesto es un indicador del grado de avance global de la pirólisis, debido a que es un producto intermedio de las reacciones primarias de pirólisis de celulosa y hemicelulosa (Huber et al., 2006; Mante y Agblevor, 2010). La región entre 900 y 700 cm^{-1} contiene picos débiles relacionados con compuestos aromáticos con flexión C–H.

Las señales en los rangos 924-870 cm^{-1} y 850 a 700 cm^{-1} son características del furfural y de los furanos (Kwiothowski et al., 1997), y fueron más intensas en el espectro generado por el tar de BCA, en concordancia con el mayor contenido de holocelulosa de esta biomasa.

Este análisis FTIR confirma la presencia de varios componentes químicos como alcanos, alquenos, compuestos aromáticos y varios compuestos que contienen oxígeno, como fenoles, cetonas, ácidos carboxílicos o aldehídos, etc., coincidente con los resultados del análisis ^1H RMN. De ambos análisis, se puede concluir que muchas de las moléculas de los tars contienen múltiples unidades aromáticas unidas por unidades alifáticas.

Composición y propiedades del char

La caracterización de los chars se presenta en la Tabla 6, donde se observan bajos contenidos de humedad en ambas muestras (valor obtenido luego de conservar el char durante más de una semana bajo condiciones ambientales normales). El char de BCA presentó un elevado contenido en carbón fijo, carbono y oxígeno en comparación a su biomasa de origen (Tabla 1), y por lo tanto un mayor PCS. Esta evidente concentración de energía hace factible la utilización de este producto como combustible. El alto contenido en cenizas del char de CA fue consistente con las cenizas en su biomasa de origen. En términos generales, el contenido de carbono (y, en consecuencia, el PCS) del char aumenta cuando es menor el contenido de cenizas de la biomasa de origen.

Tabla 6: Composición y propiedades de los chars

	Bagazo de Caña de Azúcar	Cáscara de Arroz
Humedad (%p)	5,1	5,2
Análisis proximal (%p, base seca)		
Cenizas	9,1	51,0
Sólidos volátiles	23,6	13,3
Carbón fijo	67,3	35,7
Análisis elemental (%p, base seca)		
C	75,0	38,7
H	3,1	1,7
O	12,3	8,1
N	0,6	0,5
PCS (MJ kg^{-1})	27,6	14,0

En la Tabla 7 se presentan las composiciones de las cenizas contenidas en el char obtenido en la pirólisis de ambas biomásas, donde se observa que la SiO_2 fue el principal componente en ambos casos. Particularmente, en el caso de la CA, la sílice (SiO_2), la alúmina (Al_2O_3) y el K_2O representaron el 97 % de las cenizas, lo que otorga a este char la posibilidad de utilizarse en la obtención de sílice (Azat et al., 2019). Por su parte, las cenizas del char de BCA presentaron una cantidad relativamente importante de CaO , y cantidades menores de alúmina (Al_2O_3), Fe_2O_3 , K_2O y Cl , además de la sílice.

Tabla 7: Composición de las cenizas de los chars (%)

	Bagazo de Caña de Azúcar	Cáscara de Arroz
SiO_2	65,01	90,20
Al_2O_3	4,40	3,91
K_2O	3,15	2,95
CaO	17,78	1,21
P_2O_5	0,51	0,51
Cl	2,27	0,36
MnO	0,21	0,33
Fe_2O_3	3,92	0,30
SO_3	1,94	0,17
CuO	0,19	0,02
Br	-	0,02
ZnO	0,11	0,02
TiO_2	0,44	-
SrO	0,07	-

Se observó en la composición elemental de los chars de pirólisis que son factibles a ser utilizados en la preparación de carbón activado (Fadhil y Kareem, 2021), o en la mejora de la fertilidad del suelo (Yang et al., 2019). Además, debido a que poseen una gran superficie, estos materiales se pueden utilizar para filtración y adsorción de contaminantes y con procesos de activación física o química se puede mejorar esta característica. Algunos estudios demuestran que los char de pirólisis tienen superficies hidrófilas, resultando adecuados para eliminar iones metálicos y otros contaminantes del agua (Wang y col., 2019).

En la fase inorgánica de los chars, las especies de carbono se pueden clasificar como carbonato y bicarbonato, mientras que el oxígeno existe principalmente en forma de óxidos metálicos, hidróxidos o grupos como carbonato, bicarbonato y sulfato, siendo generalmente estable y contribuyendo a la alcalinidad de los mismos. El fósforo en la biomasa se transforma de orgánico a inorgánico a través de la carbonización y luego puede servir como nutriente para el suelo o como sitio de absorción de metales pesados. Otros elementos nutrientes como Na, K, Ca, Mg y Mn pueden constituir fracciones importantes en los chars, u otras veces se agregan para funcionalizarlos (Xiao et al., 2018).

CONCLUSIONES

Se caracterizaron los productos líquidos, sólidos y gaseosos de la pirólisis de bagazo de caña de azúcar y de cáscara de arroz, para generar información útil al considerar las distintas aplicaciones factibles para su valorización. Con el análisis de las propiedades de las biomásas y los rendimientos de pirólisis, se observó que estos subproductos agroindustriales dan buenos rendimientos a bio-oil (caso del BCA) y a char (caso de la CA). Los bio-oils estuvieron compuestos por dos fracciones, una acuosa, compuesta principalmente por ácidos, fenoles y cetonas, y la otra alquitranosa (tar), rica en compuestos aromáticos, alcoholes y fenoles. Esto muestra la viabilidad de la utilización del tar en numerosas aplicaciones, tales como fuente alternativa de fenol para resinas de fenol-formaldehído, reemplazo parcial de recursos fósiles en mezclas asfálticas (cumpliendo, además, el rol de antioxidantes) y reemplazo de polímeros para la obtención de microesferas soporte de agroquímicos y

biocidas, entre otras. Biomásas residuales con bajo contenido de cenizas, como es el BCA, generan chars con mayor contenido de carbono, lo que los hace factibles de ser utilizados como combustible, en la preparación de carbón activado, o para mejorar la fertilidad del suelo. Las biomásas con mayor contenido de cenizas, como la CA, generan chars de menor poder calorífico, pero pueden tener otras rutas de valorización como, por ejemplo, la obtención de sílice pura.

REFERENCIAS

- Al Arni S. (2018). Extraction and isolation methods for lignin separation from sugarcane bagasse: a review. *Industrial Crops and Products*, 115, 330-339. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.012>
- Alvarez J., Lopez G., Amutio M., Bilbao J. y Olazar M. (2014). Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 128, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.074>
- Azat S., Korobeinyk A. V., Moustakas K. y Inglezakis V. J. (2019). Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of cleaner production*, 217, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>
- Bertero M., De la Puente G. y Sedran U. (2012). Fuels from bio-oils: Bio-oil production from different residual sources, characterization and thermal conditioning. *Fuel*, 95, 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.041>
- Bezerra T. L. y Ragauskas A. J. (2016). A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10 (5), 634-647. <https://doi.org/10.1002/bbb.1662>
- Biswas B., Pandey N., Bisht Y., Singh R., Kumar J. y Bhaskar T. (2017). Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource technology*, 237, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>
- Bridgwater A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Cha J. S., Park S. H., Jung S. C., Ryu C., Jeon J. K., Shin M. C. y Park Y. K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chen T., Wu C., Liu R., Fei W. y Liu S. (2011). Effect of hot vapor filtration on the characterization of bio-oil from rice husks with fast pyrolysis in a fluidized-bed reactor. *Bioresource Technology*, 102 (10), 6178-6185. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.023>
- Di Blasi C., Signorelli G., Di Russo C. y Rea, G. (1999). Product distribution from pyrolysis of wood and agricultural residues. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38 (6), 2216-2224. <https://doi.org/10.1021/ie980711u>
- Fadhil A. B. y Kareem B. A. (2021). Co-pyrolysis of mixed date pits and olive stones: Identification of bio-oil and the production of activated carbon from bio-char. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105249. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105249>
- Huber G. W., Iborra S. y Corma A. (2006). Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical reviews*, 106 (9), 4044-4098. <https://doi.org/10.1021/cr068360d>
- Kanaujia P. K., Sharma Y. K., Agrawal U. C. y Garg M. O. (2013). Analytical approaches to characterizing pyrolysis oil from biomass. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 42, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.09.009>
- Kwiatkowski J. S., Leszczyński J. y Teca I. (1997). Molecular structure and infrared spectra of furan, thiophene, selenophene and their 2, 5-N and 3, 4-N derivatives: density functional theory and conventional post-Hartree-Fock MP2 studies. *Journal of molecular structure*, 436, 451-480. [https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(97\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(97)00125-7)
- Lim J. S., Manan Z. A., Alwi S. R. W. y Hashim H. (2012). A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16 (5), 3084-3094. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051>
- Mante O. D. y Agblevor F. A. (2010). Influence of pine wood shavings on the pyrolysis of poultry litter. *Waste Management*, 30 (12), 2537-2547. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.007>
- Mohan D., Pittman Jr C. U. y Steele P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & fuels*, 20 (3), 848-889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>

- Mullen C. A. y Boateng A. A. (2011). Characterization of water insoluble solids isolated from various biomass fast pyrolysis oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 90 (2), 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.12.004>
- Mullen C. A., Strahan G. D. y Boateng A. A. (2009). Characterization of various fast-pyrolysis bio-oils by NMR spectroscopy. *Energy & Fuels*, 23 (5), 2707-2718. <https://doi.org/10.1021/ef801048b>
- Nsubuga H., Basheer C., Al-Muallem H. A. S. y Kalanthoden A. N. (2016). Isolation, characterization and evaluation of photochemical potential of rice husk-based furfural via continuous flow reactor. *Journal of environmental chemical engineering*, 4 (1), 857-863. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.12.026>
- Park K. B., Kim J. S., Pahlavan F. y Fini E. H. (2022). Biomass Waste to Produce Phenolic Compounds as Antiaging Additives for Asphalt. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10 (12), 3892-3908. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c07870>
- Pujro R., García J. R., Bertero M., Falco M. y Sedran U. (2021). Review on reaction pathways in the catalytic upgrading of biomass pyrolysis liquids. *Energy & Fuels*, 35 (21), 16943-16964. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01931>
- Rada Arias E., Bertero M., Sedran U., Falco M. (2019). Obtención de productos químicos a partir de pirólisis de biomasa. *Actas del II Congreso de Química del Caribe*. Baranquilla, Colombia.
- Rosado M. J., Rencoret J., Marques G., Gutiérrez A. y Del Río J. C. (2021). Structural characteristics of the guaiacyl-rich lignins from rice (*Oryza sativa* L.) husks and straw. *Frontiers in Plant Science*, 12, 640475. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.640475>
- Taverna M. E., Busatto C. A., Saires P. J., Bertero M. P., Sedran U. A. y Estenoz D. A. (2022). Bio-Composite Films Based on Alginate and Rice Husk Tar Microparticles Loaded with Eugenol for Active Packaging. *Waste and Biomass Valorization*, 13 (6), 3061-3070. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01679-z>
- Varma A. K. y Mondal P. (2017). Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*, 95, 704-717. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.039>
- Vitolo S., Bresci B., Seggiani M. y Gallo M. G. (2001). Catalytic upgrading of pyrolytic oils over HZSM-5 zeolite: behaviour of the catalyst when used in repeated upgrading-regenerating cycles. *Fuel*, 80 (1), 17-26. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00063-6)
- Wang L., Wang Y., Ma F., Tankpa V., Bai S., Guo X. y Wang X. (2019). Mechanisms and reutilization of modified biochar used for removal of heavy metals from wastewater: a review. *Science of the total environment*, 668, 1298-1309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.011>
- Wang S., Wang Y., Cai Q., Wang X., Jin H. y Luo Z. (2014). Multi-step separation of monophenols and pyrolytic lignins from the water-insoluble phase of bio-oil. *Separation and Purification Technology*, 122, 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.11.017>
- Xiao X., Chen B., Chen Z., Zhu L., Schnoor J. (2018). Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review. *Environmental science & technology*, 52 (9), 5027-5047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06487>
- Yang X., Zhang S., Ju M. y Liu L. (2019). Preparation and modification of biochar materials and their application in soil remediation. *Applied Sciences*, 9 (7), 1365. <https://doi.org/10.3390/app9071365>

CHARACTERIZATION OF PYROLYSIS PRODUCTS OF AGRO-INDUSTRIAL BYPRODUCTS

ABSTRACT: The pyrolysis of lignocellulosic agro-industrial byproducts (rice husk and sugarcane bagasse) was studied and the products obtained were characterized in terms of their composition and physicochemical properties, with the aim of evaluating their suitability to various applications. High contents of C (between 60 and 70 %w) and O (between 20 and 30 %w) were observed in the tars, the occurrence of large amounts of aromatic compounds and aliphatic protons (NMR), alcohols and phenols (FTIR) being detected. The O content in the solid materials was reduced by around 75 % (the chars as compared with the raw biomass), inorganic components being concentrated in them. Particularly, the rice husk char contained 51 % of ash, the main component being silica (90 %). The aqueous fraction of both bio-oils was mainly composed of acids, phenols, ketones and furans, and the gases had heating values such that they can be used as fuel. Based on these results, it is possible to define the use and valorization options for all the products generated in the pyrolysis of the agro-industrial byproducts studied.

Keywords: biomass, pyrolysis, tar, char, energy, chemicals.

SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO Y SOLAR FOTOVOLTAICO EN MENDOZA, ARGENTINA

Andrés O. Benito^{1,2}, Nicolás Villanueva², Cristian Morillas², Alejandro Burlot², Alejandro P. Arena¹, Juan Carlos Luna³

¹Empresa Mendocina de Energía S.A.P.E.M. – Gerencia de Energías Renovables, Patricias Mendocinas 1285 – Provincia de Mendoza, Argentina, C.P. 5500. Tel. +54-261-5244693. E-mail: abenito@emesa.com.ar

²Grupo CLIOPE, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza. J. Rodríguez 273, Ciudad de Mendoza, Provincia de Mendoza, Argentina, C.P. 5500. Tel. +54-261-5244693. E-mail: andresbenito@frm.utn.edu.ar

³Tecnología y Servicios Ambientales S.A. – Gerencia General de Mendoza, Necochea 183 – 1º Piso, Provincia de Mendoza, Argentina, C.P. 5500. Tel. +54-261-4251027.

RESUMEN: La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por el biogás de rellenos sanitarios causa graves problemas ambientales y sociales. La captación y uso eficiente del biogás puede reducir su impacto ambiental. En el área metropolitana de Mendoza, se generan alrededor de 1.300 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales el 65% van al relleno sanitario El Borbollón. Este estudio presenta los resultados de la implementación del primer sistema híbrido de generación de energía eléctrica a partir de biogás y energía solar en relleno sanitario. Esta solución alternativa permite una gestión responsable de los RSU y diversifica la matriz energética regional. Se analizan la producción de biogás, su captación, conducción, tratamiento y acondicionamiento para su combustión, así como aspectos de ingeniería eléctrica en el marco del conjunto tecnológico funcionando en régimen de generación distribuida conectado a la red. Los resultados muestran que con una generación anual media de 6.387 MWh/año y una reducción de emisiones de GEI de entre el 44,1% y el 70,5%, el uso de biogás de RSU en pequeñas ciudades también puede ser llevado a cabo en el marco de generación distribuida como estrategia de mitigación del cambio climático.

Palabras clave: biogás de relleno sanitario; fotovoltaico; generación distribuida; cambio climático.

INTRODUCCIÓN

En la República Argentina, la tasa de generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por habitante es de 1,15 kg/día y la fracción orgánica constituye entre el 40% y el 50% del total (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Sin embargo, los residuos orgánicos generados en mayor cantidad son los que menos se gestionan (ONU Medio Ambiente, 2018). Esto conduce a la existencia de problemas de diversa naturaleza, como la producción de gases de efecto invernadero (GEI) y lixiviados, la contaminación de cuerpos de agua, la proliferación de vectores de enfermedades humanas, y la pérdida del potencial energético contenido en los RSU. Por tanto, con el propósito de contribuir a resolver el problema de la gestión eficiente de los RSU generados en el Gran Mendoza (constituido por los departamentos de Ciudad de Mendoza, Godoy Cruz, Guaymallén, Maipú, Las Heras y Luján de Cuyo), la Empresa Mendocina de Energía S.A.P.E.M. (EMESA) y la empresa Tecnología y Servicios Ambientales S.A. (TySA) desarrollaron y construyeron el *Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico (SHGE)* sobre el que a continuación se describirán los trabajos realizados y resultados obtenidos.

En términos energéticos, el proyecto reporta la triple ventaja de disminuir el consumo energético en la gestión de RSU en Mendoza; obtener un producto principal de alto valor agregado con beneficios ambientales, económicos y desarrollo social, como lo es la energía eléctrica distribuida de origen renovable; y contribuir a la seguridad energética de la población de la provincia Mendoza, así como la diversificación de su matriz energética, contrastando con la situación actual, donde la electricidad generada en la provincia es mayoritariamente basada en fuentes fósiles, con 1.509 MW de potencia instalada y 4.521.394 MWh de generación eléctrica para el 2022, de los cuales el 69,52% correspondió a procesos que utilizan combustibles fósiles, el 29,89% a procesos hidráulicos y el 0,59% a renovable con tecnología solar fotovoltaica (FV); todo el proceso de generación implicó un consumo (medido en TeP - Toneladas equivalentes de Petróleo) de 542.677 TeP de gas natural y 4.065 TeP de fuel oil (CAMESA, 2023).

En términos socio-ambientales se buscó ampliar la conciencia social sobre la problemática del vertido de RSU a cielo abierto, en contraposición a los beneficios y oportunidades que conlleva una gestión más eficiente y responsable en la disposición de estos, con el incentivo ambiental y económico que provoca la generación eléctrica renovable, mediante la captura de GEI, principalmente metano, reduciendo el impacto ambiental en el tratamiento y transformación de los RSU, los que en Mendoza se generan en promedio en 1.800 toneladas por día, de las cuales 1.300 corresponden al área metropolitana o Gran Mendoza, de los cuales el 65% se vierten en el relleno sanitario El Borbollón (Secretaría de Ambiente, 2018). Los volúmenes de generación mencionados se condicen con la tasa de generación de 1,15 kg/hab/día (kilogramos por habitante por día) promedio nacional (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2005). En base a lo antedicho, se resalta que este proyecto impulsa a cumplir con los objetivos 7, 8, 9, 11 y 13 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (United Nations, 2020).

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo es presentar los resultados de la ejecución y puesta en servicio del caso de estudio SHGE, a partir de la valoración y aprovechamiento de los RSU del relleno sanitario El Borbollón, en la provincia de Mendoza, Argentina, como una solución alternativa para la gestión responsable de los RSU. A su vez, los objetivos particulares del trabajo se ajustan a sentar precedente sobre la hibridación de tecnologías de generación de energías renovables en un contexto de complejidad técnica, política, ambiental y social, sirviendo de modelo de un caso de éxito pionero en la región, contribuyendo con estrategias y soluciones en diversos aspectos tales como: la producción de biogás de RSU (con su modelo predictivo de producción potencial), el sistema de captación y conducción de biogás, el tratamiento y acondicionamiento de este para su posterior combustión y generación de energía eléctrica. Finalmente, se resalta que la metodología utilizada para este trabajo, en torno al proyecto de referencia, presenta una contribución a la ciencia aplicada en desarrollos a escala piloto a nivel regional, que apelan a la transferencia tecnológica y de conocimiento a la sociedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

A grandes rasgos, los vertederos de RSU se pueden clasificar en tres tipos: vertederos a cielo abierto, vertederos semi-controlados y rellenos sanitarios (Narayana, 2009). Los vertederos a cielo abierto son áreas donde los RSU se arrojan sin control, en un entorno abierto en contacto directo con el aire. Los vertederos semi-controlados son vertederos gestionados, en los que los residuos se descargan en celdas donde se trituran, nivelan y cubren con tierra. Aunque estos vertederos generan menos olores que los a cielo abierto debido a la cubierta de tierra vegetal, no están diseñados para capturar las emisiones de gases, ni la descarga de lixiviados (Narayana, 2009). Contrariamente, el relleno sanitario del presente caso de estudio (El Borbollón), es una versión mejorada de los vertederos semi-controlados, permitiendo la clasificación, segregación, reducción de tamaño y densificación de los RSU in situ. Además, cuenta con instalaciones diseñadas para capturar el biogás generado por la digestión anaeróbica natural de la descomposición de la Fracción Orgánica de los RSU (FORSU).

La producción de biogás de RSU o gas de vertedero (*Landfill gas*) se debe a condiciones térmicas, químicas y biológicas, que dan lugar al mecanismo de formación de este tipo de gas, a través de diversas reacciones como la hidrólisis, fermentación, oxidación anaeróbica, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Entre las diversas y prolíferas comunidades bacterianas implicadas en la digestión

anaeróbica de la FORSU en un vertedero (Demirel y Scherer, 2008), son principalmente las bacterias metanogénicas las encargadas de la formación de biogás, ya que este puede contener aproximadamente un 40% de metano (CH₄) y un 45% de dióxido de carbono (CO₂) (Ehrig et al., 2011), seguidos de trazas de monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N₂), compuestos orgánicos volátiles, benceno, tolueno, xileno, tetracloruro de carbono, hidrocarburos, compuestos órgano-azufrados (Narayana 2009) y compuestos orgánicos no metánicos (NMOC –Nonmethane Organic Compounds) (Norouzi et al., 2022; Calbry-Muzyka et al., 2022).

Modelo predictivo para la producción potencial de metano de relleno sanitario

El presente estudio emplea el modelo predictivo desarrollado por la *United States Environmental Protection Agency* (US EPA), denominado LandGEM (*Landfill Gas Emission Model*) (US EPA, 2005). Este modelo utiliza una ecuación de descomposición cinética de primer orden (Ec. 1), la que asume que la generación de metano es función de la cantidad de RSU vertidos y que el metano generado en un año determinado es el resultado de los RSU vertidos en el año bajo análisis más la generación de metano acumulada por los RSU vertidos en años anteriores con referencia al año bajo análisis (Panesso et al., 2011).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

donde, Q_{CH_4} es la generación anual de metano en (m³_{CH₄}/año); M_i es la cantidad promedio de residuos dispuestos en el relleno sanitario en el año i medida en (t/año); k es la constante del índice de generación de metano medida en (año⁻¹), que depende de las precipitaciones de la locación; L_0 es el potencial de generación de metano (m³_{CH₄}/t); i es el incremento temporal del año; j es un incremento temporal de 0,1 años; y t_{ij} es la edad de la j^{a} sección de residuos aceptada en el año i . A su vez, el modelo LandGEM contempla de forma intrínseca el factor f_{CH_4} , siendo la fracción de metano contenido en el biogás (%) (dicha fracción para nuestro caso de estudio se observa en la sección de resultados en la Tabla 1). Se consideró a su vez dentro del modelo, que el cierre del relleno sanitario será en el año 2040, momento en el cual la provincia de Mendoza alcanza una población proyectada de 2.328.963 habitantes, de los cuales 1.435.434 habitantes corresponderán al área del Gran Mendoza (DEIE, 2019). Para nuestro caso de estudio el factor k toma el valor 0,02 año⁻¹ y L_0 toma el valor 60 m³/t (García, 2003; US EPA, 2005), en consideración de la locación del relleno sanitario El Borbollón, donde las precipitaciones acumuladas promedio anual se mantienen en valores cercanos al promedio de los últimos 10 años (244,2 mm) (Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas, 2018).

Sistema de captación, conducción, tratamiento y acondicionamiento de biogás de residuos sólidos urbanos para su combustión

Lo descrito a continuación se aprecia de forma infográfica en la Figura 1, dando lugar a las principales características del SHGE.

Así, a favor de realizar una adecuada captura del biogás generado, se diseñó un sistema de captación para tal fin, conformado por una serie de colectores verticales que van desde la base de cada celda hasta su coronación, conformados por estructuras circulares metálicas de gran diámetro que están en contacto directo con los residuos y tuberías plásticas concéntricas (una perforada interior y una camisa exterior) que permiten que el biogás fluya confinado desde la base de la celda hacia la superficie, llegando a diversos cabezales con válvula de corte y una antirretorno, que se conectan a una red de tuberías sobre la superficie que permiten conducir el biogás hacia la etapa de tratamiento y acondicionamiento.

El biogás procedente de las celdas y mediante la red de tuberías es aspirado hacia la sala de tratamiento y acondicionamiento, donde pasa por un deshidratador primario, quitándole parcial o totalmente el contenido de humedad. A partir de la salida de impulsión del soplante, el biogás podrá tomar dos caminos no excluyentes para su posterior incineración mediante un cuadro de válvulas mariposas para tal fin. Por un lado, el biogás puede quemarse en su totalidad en una antorcha de llama oculta. Y el otro camino para incineración controlada del biogás corresponde a las microturbinas constituyentes del sistema de generación de energía eléctrica detallado en el apartado 2.3. Sin

embargo, es condición necesaria para ingresar a este sistema acondicionar el biogás en cuanto al contenido de siloxanos en todas sus familias (máximo 5 ppb) y la presión del biogás en la brida de ingreso de las microturbinas (5,5 bar). Esto ocurre dentro del conjunto de compresión (Bio-Komp), confiriéndole al biogás un segundo acondicionamiento en términos de filtrado de contenido de partículas sólidas, agua y lubricantes (Amarai et al., 2022; Konkol et al., 2022).

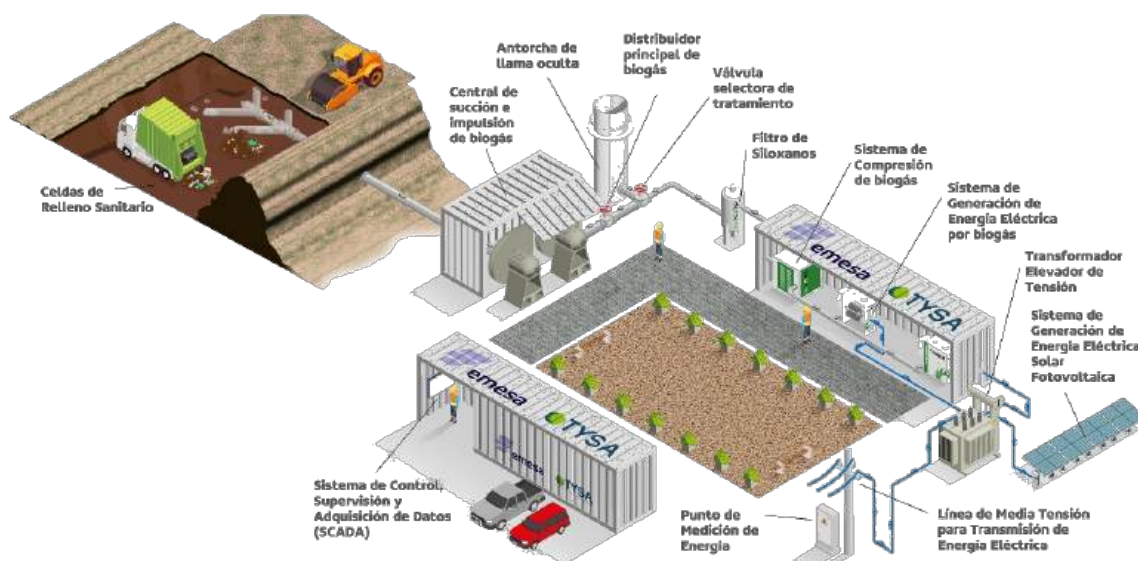


Figura 1. Infografía Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico – El Borbollón. Mendoza. Argentina. Elaboración propia.

Sistema híbrido de generación de energía eléctrica

Desde su concepción este proyecto fue conceptualizado para adherirse al régimen de Generación Distribuida que opera en la Provincia de Mendoza desde el año 2015, actualmente reglamentado por la Resolución 01/2022 (EPRE, 2022). Más aún, la resolución última mencionada permitió que el SHGE ostente las cualidades de ser el primer proyecto en Mendoza y en Argentina en formato de Punto de Sólo Inyección (PSI) y el primer proyecto en Argentina en hibridar generación de energía eléctrica distribuida a partir de biogás de RSU y solar. Con PSI nos referimos a un sistema de generación que se instala en un lugar distinto al punto de suministro del usuario, con al menos un suministro asociado para aplicar el Mecanismo de Compensación (monetización), el cual considera la tarifa eléctrica del o los suministros asociados en la proporción declarada para cada uno en el Contrato de Recursos de Energía Distribuida (EPRE, 2022).

En cuanto a la generación de energía eléctrica a partir de biogás procedente de RSU, podemos mencionar que existen diversas tecnologías de conversión biológica para su utilización (Bajić et al., 2015) y algunos estudios, en línea con nuestro trabajo, demuestran que el biogás de relleno sanitario en particular puede efectivamente usarse para generar electricidad (Kale et al., 2020; Buragohain et al., 2021). El aprovechamiento de este tipo de biogás suele ser una alternativa tecnológica que encuentra sentido técnico-económico en municipios de más de 200.000 habitantes, según Barros et al. (2014).

Para nuestro proyecto el potencial teórico de generación de electricidad por recuperación de biogás de RSU (ERP_{BG_RSU}), se calculó utilizando el siguiente modelo matemático, ecuación (2), (Alzate et al., 2019) (por facilidad de análisis, en este artículo se utilizan las unidades de energía en MWh):

$$ERP_{BG_RSU} = PCI_{BG_RSU} \cdot Q_{CH_4} \cdot \gamma \cdot \eta \quad (2)$$

$$PCI_{BG_RSU} = f_{CH_4} \cdot PCI_{Metano} \quad (3)$$

donde, ERP_{BG_RSU} es el potencial teórico de generación de electricidad por recuperación de biogás de RSU medido en (MWh/año); PCI_{BG_RSU} es el poder calorífico inferior del biogás en (MWh/m³); Q_{CH_4} es la generación anual de metano en (m³/año) dado por la ecuación (1); γ es la eficiencia del sistema de recuperación de biogás (%), la cual puede ser baja (50%), media (60%) o alta (80%); y η es la

eficiencia eléctrica de la tecnología utilizada para generar electricidad (%). En nuestro caso γ toma el valor 50% de acuerdo con Alzate et al. (2019) y η toma el valor 29% según información del fabricante de la tecnología utilizada (Capstone, 2021). Luego, el poder calorífico inferior del biogás de RSU se calcula con la ecuación (3), donde f_{CH_4} (%) es la fracción de metano contenida en el biogás de RSU y PCI_{Metano} es el poder calorífico inferior del metano, en nuestro caso se toma el valor reportado por el Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS, 2019). Dado que f_{CH_4} y el poder calorífico inferior del biogás (PCI_{BG_RSU}), pueden variar según la antigüedad del vertedero y la calidad de los residuos sólidos urbanos, es recomendable tomar muestras periódicas del biogás generado para así verificar su calidad gas antes de la combustión. La metodología de análisis aplicada para realizar dicha verificación de calidad es por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica por el sistema de áreas normalizadas utilizando patrón de calidad certificada para la determinación de los factores de respuestas, donde el equipamiento utilizado es un cromatógrafo de gases marca SHIMADZU GC-9A con detector de conductividad térmica y columna de 2 metros de Porapac Q. Considerando el valor máximo del porcentaje de metano (f_{CH_4}), indicado en la Tabla 1 de la sección de resultados y, reemplazando los valores obtenemos:

$$PCI_{BG_RSU} = 35,10\% \cdot 0,00913 \text{ MWh}/m^3 \quad \therefore \quad PCI_{BG_RSU} = 0,003204 \text{ MWh}/m^3$$

La tecnología seleccionada para este proyecto se trató de microturbinas a gas capaces de funcionar con las particularidades de un biogás de relleno sanitario, referidas a su bajo poder calorífico y posibles contenidos de siloxanos (Pan et al., 2023; Osra et al., 2021). Se cuenta con dos microturbinas marca Capstone Green Energy, modelo C65, en configuración *Grid Connect* de 65 kW cada una (en condiciones ISO). Esta tecnología es pionera en la región, siendo las primeras microturbinas en Mendoza, en Argentina, y en América Latina funcionando con biogás de relleno sanitario; la empresa Capstone sólo registra 2 proyectos similares en otras latitudes, uno en Rubi, España y otro en La Ciotat, Francia.

En términos técnicos, cada microturbina es un sistema de generación de energía estacionario que proporciona energía eléctrica in situ. Cada microturbina puede generar energía en paralelo con la red de distribución de la compañía eléctrica (modo *Grid Connect*) o aislada de ella (modo autónomo o *Stand Alone*). Cada equipo consta de una turbina, un sistema de electrónica de potencia de estado sólido y un sistema de combustible. Debido al confinamiento de las microturbinas en un contenedor marítimo de 12m de longitud (40ft), a dicho recinto se lo dota de un ventilador externo que insufla aire en exceso al interior de manera que las microturbinas tengan la cantidad requerida de aire para la correcta combustión del biogás y refrigeración de la electrónica de potencia (26.300 slpm y 14.200 slpm, *standard liters per minute*, respectivamente). Los principales componentes de la turbina se observan en la Figura 2a en su corte transversal y en la Figura 2b en su diagrama funcional simplificado. El rodete del compresor, el rotor de la turbina y el rotor del generador están montados en un único eje (Capstone, 2021).

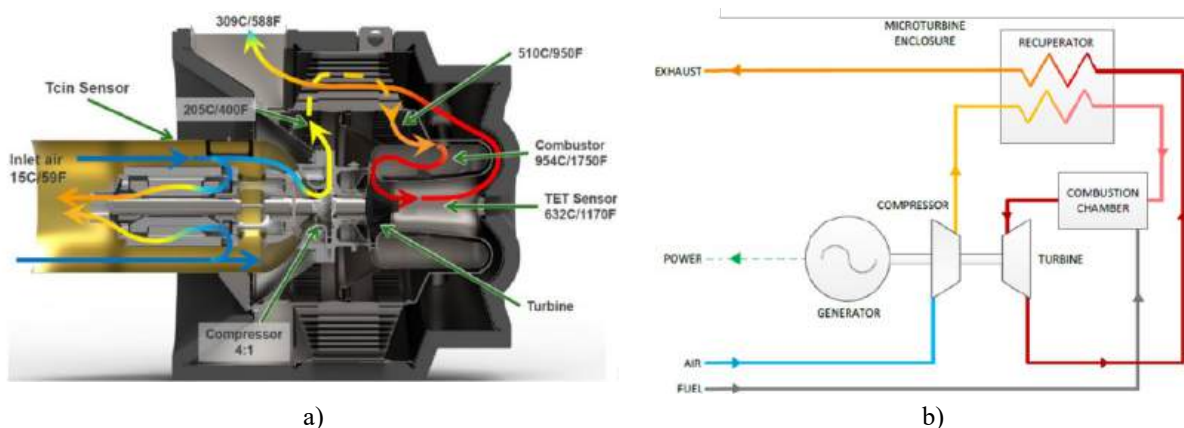


Figura 2. a) Corte transversal de la turbina con indicación de flujo de aire. b) Diagrama funcional simplificado. Microturbina Capstone Green Energy, modelo C65-GC. Fuente: Capstone (2021).

Por otra parte, la energía eléctrica a partir de tecnología solar FV se genera en un sistema fotovoltaico en modalidad *conectado a la red*, es decir tomando referencia de tensión y frecuencia de la red de distribución pública de energía eléctrica (Khan et al., 2022). Este sistema está compuesto por 16 módulos FV marca LV-Energy, modelo LVE72PSe de una potencia pico de 330 Wp (en condiciones STC), los que conformando 2 cadenas de 8 módulos cada una, se conectan a un inversor de corriente marca SMA, modelo Sunny Tripower 5000TL. Los módulos FV están dispuestos sobre una estructura metálica directamente hincada sobre la superficie de una celda del relleno sanitario ya clausurada, con una inclinación fija de 30°, lo que permite un aprovechamiento óptimo de la radiación solar incidente de lugar (Grossi Gallegos y Righini, 2007).

Cada etapa o subsistema del conjunto tecnológico cuenta con sus protecciones eléctricas independientes y a su vez la totalidad del conjunto cuenta con sistemas de protecciones eléctricas de potencia que efectivizan la hibridación de las tecnologías de generación, al mismo tiempo que aportan la condición de operación segura, tanto del personal como de los equipos. A su vez, las protecciones eléctricas, sensores de campo, inversores de corriente, variadores de frecuencia, y paradas de emergencia, tanto del sistema de generación por biogás, como del sistema FV están vinculadas a un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), el cual es el encargado, a través de un Controlador Lógico Programable (PLC), de coordinar de forma automática todos los sistemas y elementos antes mencionados, como así también de gestionar los enclavamientos, permisivos de cierres de interruptores de potencia, indicar alarmas y sacar el sistema de funcionamiento en caso de falla o de manifestarse un ambiente con atmósfera explosiva por acumulación de metano.

Por otra parte, la energía eléctrica generada por ambas fuentes renovables se evacúa a través de un transformador de potencia elevador, que lleva la tensión de salida de la generación (0,4 kV) a los 13,2 kV requeridos para transportar dicha energía por una línea aérea de media tensión (LAMT) de una longitud de 1,2 km hacia el punto de medición fuera del predio del proyecto bajo análisis. Asimismo, para dar cumplimiento a los requerimientos exigidos por la empresa distribuidora eléctrica y a lo dispuesto en la Resolución 01/2022 del EPRE en materia técnica, se montaron en ambos extremos de la LAMT sendos reconectores automáticos de media tensión, marca Tavrida, modelo Rec15/25_A11_5p, uno a la salida del transformador (lado generación) y otro en la interconexión de la LAMT interna con la LAMT del servicio de distribución (lados distribuidora).

La parametrización de las funciones de protección del controlador electrónico del reconector requirió primeramente la realización de un Estudio, Cálculo y Ajuste de Protecciones (ECAP) que permitiera la operación coordinada entre las protecciones de ambos extremos de la LAMT y también entre las protecciones más cercanas de la red de distribuidora, verificando en ambos casos el comportamiento eléctrico y térmico de los componentes del sistema ante fallas trifásicas, bifásicas y monofásicas en los mismos (IEEE, 2001). Los cálculos de ajustes de ambos reconectores se realizaron para las siguientes funciones de protección (entre paréntesis la nomenclatura ANSI estándar C.37.2 de las mismas) (IEEE, 2008): Sobrecorriente direccional (67/67N); Sobrecorriente de Fase (50/51); Sobrecorriente de tierra (50N/51N); Sobretensión (59); Sub-tensión (27); Potencia inversa (32); Protección Anti-isla o *Vector Shift* (78); Protección de Mínima y Máxima Frecuencia (81). Con los resultados de los ajustes se procede a realizar los ensayos en fábrica (FAT - *Factory Acceptance Test*) y luego con las protecciones electrónicas montadas en sus gabinetes se replican los ensayos en sitio (SAT - *Site Acceptance Test*).

Emisiones de gases de efecto invernadero

Adicionalmente, es posible establecer las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) del Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico, medidas en toneladas equivalentes de CO₂ (tCO_{2eq}), ecuación (6). Estas emisiones de GEI tienen dos componentes principales, las emisiones generadas por la producción de biogás de RSU a raíz de la disposición controlada de los RSU, las cuales se obtienen por la ecuación (4), y, por otro lado, las emisiones de GEI evitadas o reducidas por la captura de incineración del biogás del relleno sanitario y por la generación FV del Sistema Híbrido, las que se obtienen por medio de la expresión (5). De esta manera podemos cuantificar el aporte ambiental de un proyecto de este tipo. Entonces:

$$T_{CO_{2eq}BG_RSU} = T_{CO_{2}BG_RSU} + F_{CO_{2eq}CH_4} \cdot Q_{CH_4} \quad (4) \quad T_{CO_{2eq}EVITADAS} = \gamma \cdot F_{CO_{eq}CH_4} \cdot Q_{CH_4} + F_{CO_{eq}EEFV} \cdot E_{FV} \quad (5)$$

donde, para la ecuación (4) $T_{CO_{2eq}BG_RSU}$ son las toneladas de dióxido de carbono equivalente de la generación de biogás del relleno sanitario ($t_{CO_{2eq}}/año$); $T_{CO_{2}BG_RSU}$ es la cantidad de emisiones de dióxido de carbono generado por los RSU del relleno sanitario, es decir la cantidad de CO_2 contenido en el biogás producido ($t_{CO_{2eq}}/año$), este valor es obtenido de los resultados de la modelación en LandGEM para nuestro caso de estudio; $F_{CO_{2eq}CH_4}$ es el factor de caracterización del metano para llevarlo a dióxido de carbono equivalente ($t_{CO_{2eq}}/t_{CH_4}$) (Krey et al., 2014). En cuanto a las emisiones evitadas, ecuación (5), tenemos $T_{CO_{2eq}EVITADAS}$ son las emisiones de GEI evitadas totales del SHGE ($t_{CO_{2eq}}/año$); γ es la eficiencia del sistema de recuperación de biogás (%); $F_{CO_{eq}EEFV}$ es el factor de caracterización de la energía eléctrica del sistema FV inyectada la red, considerada como energía sustituida de la de nuestra matriz energética nacional ($t_{CO_{2eq}}/MWh_{EE}$) según el Inventario de GEI de la República Argentina, Años 2010 y 2012 (Moreira et al., 2019); y E_{FV} es la energía eléctrica generada por el sistema FV ($MWh/año$). Vale mencionar que se considera una combustión completa del metano que ingresa a la antorcha de llama oculta y a las microturbinas. Por lo tanto:

$$T_{CO_{2eq}NETAS} = T_{CO_{2eq}BG_RSU} - T_{CO_{2eq}EVITADAS} \quad (6)$$

donde, $T_{CO_{2eq}NETAS}$ son las emisiones de GEI evitadas netas del Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico ($t_{CO_{2eq}}/año$) (6), siendo las otras variables las descriptas anteriormente.

RESULTADOS

Resultados de cromatografías del relleno sanitario El Borbollón

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis por cromatografía de biogás del relleno sanitario El Borbollón, realizados en dos campañas de medición distanciadas dos años una de otra.

Tabla 1: Resultados de Análisis de biogás de RSU del relleno sanitario El Borbollón

Parámetro Analizado	Unidad	Valores Obtenido por Campaña de Medición		Método
		4/12/2020	26/12/2022	
Metano	% v/v	35,10	20,14	EPA 18
Nitrógeno + Oxígeno	% v/v	NA ⁽¹⁾	71,09	ASTM D 1945 y ASTM D 2597
Dióxido de Carbono	% v/v	34,20	8,76	EPA CTM-034
Sulfuro de Hidrógeno	mg/m ³	22,70	NA ⁽¹⁾	EPA 11
Dodecametilciclohexasiloxano	mg/m ³	1,20	NA ⁽¹⁾	EPA 0010/ 8260 D

⁽¹⁾ NA: No Analizado

Los resultados obtenidos se separan entre un 12,25% y un 49,65% del valor mínimo esperado para un biogás de RSU (40%) según Ehrig et al. (2011), respectivamente. Asimismo, las microturbinas requieren un mínimo de 35% de metano contenido en el biogás para funcionar, de lo contrario su sistema de control imposibilita la secuencia de encendido. Cabe destacar, que los valores de metano de los análisis cromatográficos resultantes difieren significativamente de los encontrados en ocasiones donde el sistema de conducción del biogás en superficie ha sido mantenido adecuadamente (i.e. conexionado de tuberías sueltas; purga de condensados en tuberías; ocurrencia de sifones en tuberías por asentamientos diferenciales del terreno, etc.).

Resultados del potencial teórico de producción de metano y generación de energía eléctrica a partir de biogás del relleno sanitario El Borbollón

Los resultados del potencial teórico de producción de metano del relleno sanitario se observan en la Figura 3, los cuales se obtuvieron a partir del modelo LandGEM introduciendo los valores correspondientes a nuestra situación de relleno sanitario. Luego, los resultados particulares en

condiciones de operatividad de planta, también se observan en la Figura 3, donde se ha sustraído al potencial teórico de producción de metano arrojado por la ecuación (1), los volúmenes de metano que se han incinerado en la antorcha de llama oculta durante el funcionamiento operativo a lo largo de los años de la instalación. En dicha figura también se observa la proyección de metano hacia el año 2040, alcanzando su valor máximo de $11,46 \times 10^6$ m³/año en el año 2041, correspondientes a una cantidad acumulada de 7,07 MMt (millones de toneladas) de RSU entre el año 2022 y 2040.

Reducción de rendimiento del potencial de generación de energía eléctrica por recuperación de biogás de relleno sanitario

El rendimiento de las microturbinas, como el de todas las turbinas de gas, depende de la densidad másica del aire de admisión. Los valores de rendimiento indicados por el fabricante Capstone (2021) se refieren a la potencia a plena carga en condiciones ISO (International Organization for Standardization, 2018), definidas estas a 15°C, 60% de humedad relativa y una presión a nivel del mar de 101,3 kPa, por lo que puede producirse una reducción del rendimiento a temperatura ambiente y elevaciones superiores a las condiciones ISO (Capstone, 2021).

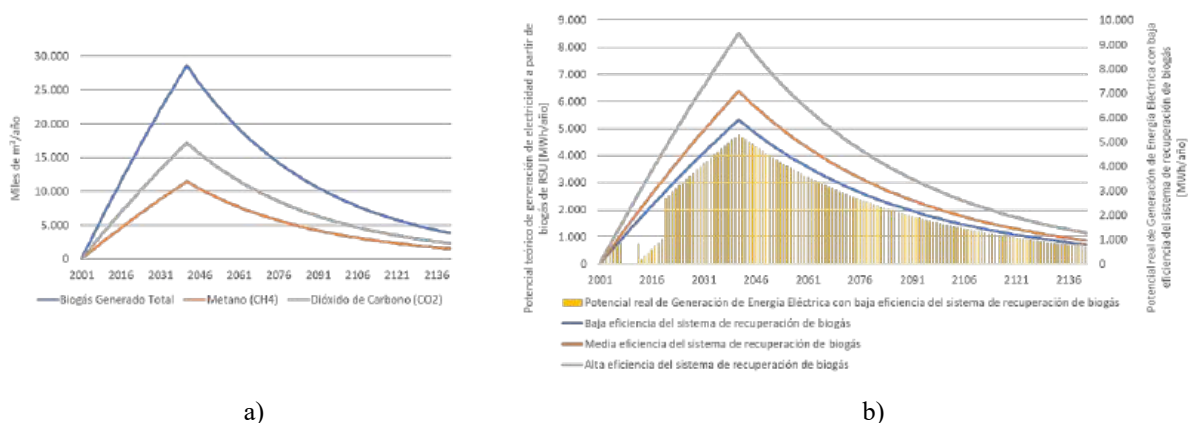


Figura 3. a) Comparación del potencial teórico de la producción de biogás con emsiones de CO₂ y CH₄. b) Potencial teórico y real de generación de electricidad. Elaboración propia.

A partir de la información brindada por el fabricante sobre las curvas características de reducción de potencia y eficiencia de las microturbinas (Capstone, 2021) realizamos una regresión lineal simple para encontrar los parámetros de funcionamiento en condiciones de temperatura ambiente media diaria (Castillo et al., 2019) y así conocer la pérdida de rendimiento para nuestro caso de estudio (Figura 4).

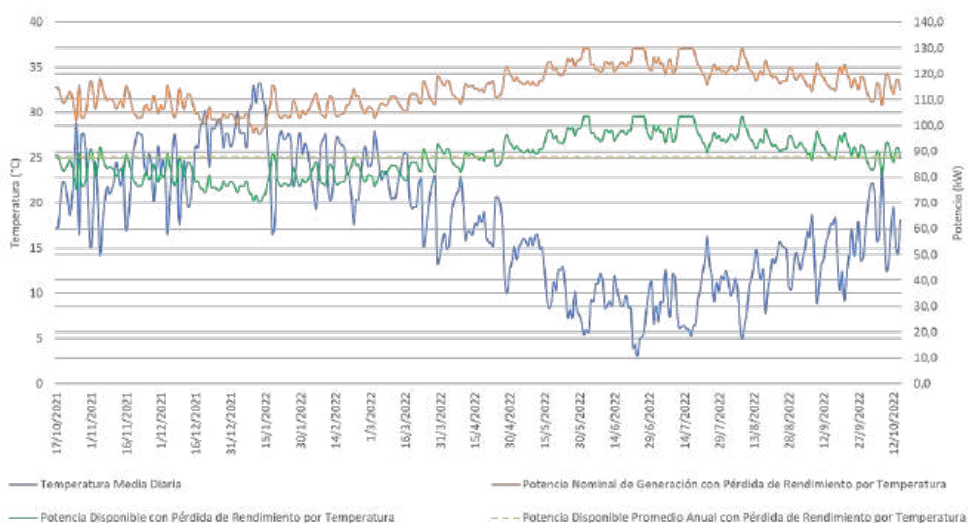


Figura 4. Variación de temperatura media anual. Potencia nominal, disponible y disponible promedio de generación con pérdida de rendimiento. Elaboración propia.

Los resultados muestran (Figura 4) cómo varía la potencia de nominal de generación en función de la temperatura ambiente media diaria. Adicionalmente se observa la potencia disponible de generación, obtenida al sustraer de la potencia nominal de generación, la sumatoria de las potencias de los sistemas periféricos, alcanzando entre las dos microturbinas una potencia mínima disponible de generación de 70,6 kW para una temperatura exterior media diaria de 33,2°C y una potencia máxima disponible de generación de 103,4 kW para una temperatura exterior media diaria de 4,0°C. También se aprecia la potencia disponible promedio anual (87,8 kW).

Resultados de la Generación Eléctrica a partir de tecnología solar fotovoltaica

La generación de energía eléctrica anual del sistema FV para el año 1 fue de 8.179 kWh_{ac}/año. Asimismo, otros indicadores energéticos resultantes fueron: i) Factor de Capacidad Lado Corriente Continua = 17,6%; ii) Relación de Calidad Energética = 1.542 kWh/kW; iii) Rendimiento = 74%; y iv) Relación DC/AC = 1,06. A partir del año 1 se estima una degradación anual del 0,5% de los módulos FV (Limmanee et al., 2016), implicando una reducción similar en magnitud a la obtenida por generación de energía eléctrica, alcanzando en el año número 25 de la instalación aproximadamente 7.252 kWh_{ac}/año.

Resultados sobre las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas

En la Figura 5 se observan las emisiones de GEI (medidas en miles de toneladas de dióxido de carbono equivalente, kt_{CO2eq}) relacionadas con la producción de biogás en sus componentes dióxido de carbono, metano y total.

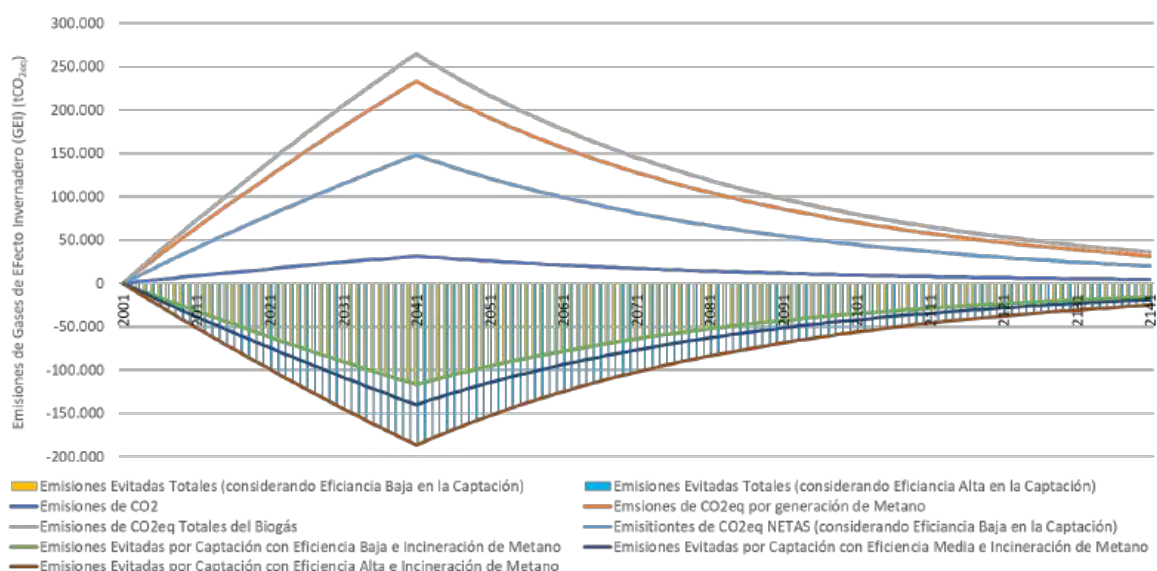


Figura 5. Resultados sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas, evitadas y netas. Elaboración propia.

En el año 2041 se alcanzan máximos de 31,4 kt_{CO2eq}/año; 233,1 kt_{CO2eq}/año; y 264,5 kt_{CO2eq}/año, respectivamente, con valores acumulados al 2041 de 671,5 kt_{CO2eq}; 4.976,4 kt_{CO2eq}; 5.648,0 kt_{CO2eq}, respectivamente. También se aprecian las emisiones de GEI evitadas acumuladas al año 2041 por la captación e incineración de biogás para los rangos de eficiencia de captación baja (-2.488,2 kt_{CO2eq}), media (-2.985,8 kt_{CO2eq}), y alta (-3.981,1 kt_{CO2eq}).

Asimismo, las emisiones de GEI evitadas acumuladas por la inyección de energía eléctrica a partir de tecnología FV a la red de distribución pública durante 25 años son -0,108 kt_{CO2eq}. Por lo tanto, las emisiones de GEI evitadas totales considerando un nivel de eficiencia de captación baja, son -2.487 kt_{CO2eq}, y considerando un nivel alto -3.981 kt_{CO2eq}, representando un 44,1% y un 70,5% de las emisiones totales sin proyecto de generación por biogás, respectivamente.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue presentar los aspectos metodológicos y técnicos del primer sistema híbrido del país y la región de generación distribuida de energía eléctrica a partir de biogás de RSU y solar FV, demostrando que a pesar de que la generación de energía eléctrica para este proyecto piloto no cobra relevancia respecto a la generación eléctrica por fuentes térmicas y renovables convencionales de la provincia de Mendoza, si lo hace respecto en materia de mitigación del cambio climático.

En términos porcentuales, de haber aprovechado en el 2022 el total del metano producido, la generación del SHGE hubiera representado apenas un 0,007% de la generación neta total y un 1,4% de la generación renovable de Mendoza para una condición de baja eficiencia del sistema de captación, y un 0,10% y un 2,2% respectivamente para una condición de alta eficiencia. Asimismo, manteniéndose al 2041 constante el parque de generación térmico y renovables de Mendoza, se esperaría que el SHGE aportara a la oferta de energía eléctrica total un 0,12% y un 2,5% a la generación renovable en baja eficiencia de captación, y un 0,19% y 4,0% respectivamente con una alta eficiencia.

Sin embargo, tal como se mencionó, el SHGE sí reviste real importancia en términos ambientales por las emisiones de GEI evitadas al ambiente. En valores, encontramos que las emisiones netas acumuladas del proyecto al año 2041 para una situación de baja eficiencia de captación, es decir el escenario más desfavorable, serían 3.160 kt_{CO2eq}, mientras que si consideramos el escenario más favorable (alta eficiencia) las emisiones netas acumuladas del SHGE serían 1.667 kt_{CO2eq}. En otras palabras, lo antedicho significa que, si no se hubiera realizado la captación y posterior combustión del metano contenido en el biogás de RSU, la gestión de RSU del Gran Mendoza hubiera liberado al ambiente en el año 2022 una cantidad de 0,147 kt_{CO2eq} y liberaría 5.648 kt_{CO2eq} acumuladas al 2041. Y en términos porcentuales se encontró que las emisiones evitadas totales, es decir las evitadas por la gestión controlada de los RSU y posterior combustión del metano generado, más las evitadas por la energía eléctrica de origen FV, representan un 4% y 6% de las emisiones de la generación eléctrica neta de Mendoza en el 2022, para baja y alta eficiencia de captación, respectivamente.

Dentro de la eficiencia tecnológica en la captación y aprovechamiento de biogás de RSU, se encuentran las actividades de mantenimiento de la red de recolección para prevenir fugas de este debido a asentamientos diferenciales de la cubierta de las celdas donde apoyan las tuberías. Las fugas se pueden detectar visualmente y luego confirmar por lectura de un bajo contenido de metano en el biogás. Cabe enfatizar que el control cromatográfico del biogás necesita ser mejorado en el futuro.

Concluimos que proyectos puramente tecnológicos como el aquí expuesto, más aún bajo su concepción de piloto con fines de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), no sólo deben velar por su éxito medido en términos técnico-económicos, sino que deben servir como herramienta de difusión y educación a la comunidad, de manera que permita construir un marco ético y moral ciudadano de gestión responsable de los residuos sólidos urbanos y de la urgente necesidad de cada vez más incorporar fuentes renovables de generación de energía eléctrica local, lo que implica reeducarnos y aprender a convivir sin perjudicar al prójimo y sin arruinar la naturaleza, si queremos legar un mundo vivible a nuestra posteridad.

REFERENCIAS

- Alzate S., Restrepo-Cuestas B., Jaramillo-Duque Á. (2019). Municipal solid waste as a source of electric power generation in Colombia: A techno-economic evaluation under different scenarios. *Resources* 8, 1, 51.
- Amaraiibi R.J., Joseph B., Kuhn J.N. (2022). Techno-economic and sustainability analysis of siloxane removal from landfill gas used for electricity generation. *Journal of Environmental Management* 314, 115070.
- Bajić B.Ž., Dodić S.N., Vučurović D.G., Dodić J.M., Grahovac J.A. (2015). Waste-to-energy status in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 1437-1444.
- Barros R.M., Tiago Filho G.L., Da Silva T.R. (2014). The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy* 65, 150-164.

- Buragohain S., Mohanty K., Mahanta P. (2021). Hybridization of solar photovoltaic and biogas system: Experimental, economic and environmental analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 45, 101050.
- Calbry-Muzyka A., Madi H., Rüsç-Pfund F., Gandiglio M., Biollaz, S. (2022). Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy* 181, 1000-1007.
- CAMMESA [en línea] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima. Informe Anual 2022. Dirección URL: <<https://cammesaweb.cammesa.com/informe-anual/>> [consulta: 28 de julio de 2023].
- Capstone Green Energy Corporation (2021). Product Specification: Capstone C65 Microturbine 460044 Rev N.
- Castillo A., Correa E., Cantón M. (2019). Geomorfología y forma urbana. Comportamiento térmico de distintas tramas en áreas de piedemonte: el caso de Mendoza, Argentina. *EURE (Santiago)* 45, 136, 183-207.
- Demirel B. y Scherer P. (2008). The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 7, 173-190.
- Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas, Gobierno de la Provincia de Mendoza (DEIE) (2019). Dinámica futura de la población Mendoza. Años 2001 – 2040. Proyección de la Población por sexo y grupos quinquenales de edad Mendoza. Período 2001-2040. Población total según departamento, proyectada al 30 de junio de cada año, ajustada a la proyección nacional y provincial Mendoza. Años 2001-2015.
- Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas, Gobierno de Mendoza (2018). Informe Año 2017 y Avance de temporada 2017/2018. Provincia de Mendoza.
- Ehrig H.J., Schneider H.J., Gossow V. (2011). Waste, 7. Deposition. ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry 38, 541–562. https://doi.org/10.1002/14356007.b08_559.pub2
- Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) (2019). NAG-602: Especificaciones de calidad para el transporte y la distribución de gas natural y otros gases análogos.
- Ente Provincial Regulador Eléctrico – EPRE (2022). Resolución N° 01/2022: Reglamento de Modalidades, Condiciones Técnicas, Comerciales y Legales del Régimen de Recursos de Energía Distribuida (Ley 9084 – Dec. N° 404/2021).
- García F. (2003). Determinación cuantitativa y cualitativa de los contaminantes atmosféricos emitidos por la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios, estudio de caso: relleno sanitario curva de rodas. Tesis de Maestría. Universidad de Antioquia.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología. ISBN 978-987-9285-36-7.
- International Organization for Standardization (2018). ISO 20675:2018 Biogas production, conditioning, definitions and classification scheme 2018.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2001). IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book), in IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book], pp.1-710, 17 Dec. 2001, doi: 10.1109/IEEESTD.2001.93369.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2008). Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations," in IEEE Std C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996), pp.1-48, 3 Oct. 2008, doi: 10.1109/IEEESTD.2008.4639522.
- Kale C. y Gökçek M. (2020). A techno-economic assessment of landfill gas emissions and energy recovery potential of different landfill areas in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122946.
- Khan M.A., Haque A., Kurukuru V.B., Saad M. (2022). Islanding detection techniques for grid-connected photovoltaic systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 154, 111854.
- Konkol I., Cebula J., Świerczek L., Piechaczek-Wereszczyńska M., Cenian A. (2022). Biogas Pollution and Mineral Deposits Formed on the Elements of Landfill Gas Engines. *Materials* 2022, 15, 2408.
- Krey V., Masera O., Blanford G., Bruckner T., Cooke R., Fisher-Vanden K., Haberl H., Hertwich E., Kriegler E., Mueller D., Paltsev S., Price L., Schlömer S., Ürge-Vorsatz D., van Vuuren D., Zwickel T. (2014). Annex II: Metrics & Methodology. In: *Climate Change 2014: Mitigation of*

- Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Limmanee A., Udomdachanut N., Songtrai S., Kaewniyompanit S., Sato Y., Nakaishi M., Kittisontirak S., Sriprapha K., Sakamoto Y. (2016). Field performance and degradation rates of different types of photovoltaic modules: A case study in Thailand, *Renewable Energy* 89, Pages 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.088>.
- Ministerio de Salud y Ambiente, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2005). Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, ENGIRSU.
- Moreira M.M., Gaioli F., Galbusera S. (2019). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Argentina-2019. 1ra Ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Narayana, T. (2009). Municipal solid waste management in India: From waste disposal to recovery of resources?. *Waste Management* 29, 3, 1163-1166.
- Norouzi O. y Dutta A. (2022). The current status and future potential of biogas production from Canada's organic fraction municipal solid waste. *Energies* 15, 2, 475.
- ONU Medio Ambiente (2018). Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina para América Latina y el Caribe. Ciudad de Panamá, Panamá.
- Osra, F. A., Ozcan, H. K., Alzahrani, J. S., Alsoufi, M. S. (2021). Municipal solid waste characterization and landfill gas generation in kakkia landfill, makkah. *Sustainability*, 13(3), 1462.
- Pan, Q., Liu, Q. Y., Zheng, J., Li, Y. H., Xiang, S., Sun, X. J., & He, X. S. (2023). Volatile and semi-volatile organic compounds in landfill gas: Composition characteristics and health risks. *Environment International*, 107886.
- Panesso A.F., Cadena J.A., Mora Flórez J.J., Ordoñez M.D. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. *Scientia Et Technica* XVII, 47, 23-28.
- Secretaría de Ambiente, Gobierno de la Provincia de Mendoza (2018). Resolución 597/2018: Centro Ambiental El Borbollón, Departamento de Las Heras, y evaluación general de remediación de basurales (en Campo Papa -Godoy Cruz-, Puente de Hierro -Guaymallén- y Campo Cacheuta -Luján de Cuyo) y Construcción de puntos verdes.
- United Nations (2020). 17 Goals to Transform Our World. Dirección URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> [consulta: 28 de julio de 2023]
- US EPA, "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide," U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. 2005. Disponible en: <https://www.epa.gov/catc/clean-air-technology-center-products#software>

HYBRID SYSTEM FOR DISTRIBUTED ELECTRICITY GENERATION THROUGH LANDFILL BIOGAS AND SOLAR PHOTOVOLTAIC IN MENDOZA, ARGENTINA

ABSTRACT: Greenhouse gas (GHG) emissions from landfill gas cause serious environmental and social problems. Capturing and using biogas efficiently can reduce its environmental impact. In Mendoza metropolitan area, around 1,300 tonnes of municipal solid waste (MSW) are generated daily, of which 65% goes to El Borbollón landfill. This study presents the results of the implementation of the first hybrid system for electricity generation from biogas and solar energy in a landfill. This alternative solution allows for responsible MSW management and diversifies the regional energy matrix. The production of biogas, its collection, conduction, treatment, and conditioning for combustion, as well as electrical engineering aspects, are analyzed in the framework of the technological setup operating in a distributed generation regime connected to the grid. The results show that with an average annual generation of 6,387 MWh/year and a reduction of GHG emissions between 44.1% and 70.5%, the use of MSW biogas in small cities can also be carried out in the framework of distributed generation as a climate change mitigation strategy.

Keywords: landfill gas; photovoltaic; distributed generation; climate change

CALIBRACIÓN DE UN RADIÓMETRO FOTOVOLTAICO SEGMENTADA EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA

Raúl Righini, Rosana Aristegui, Santiago Fioretti

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-
Universidad Nacional de Luján (UNLu)
Tel. 02323-440241–e-mail: raulrighini@yahoo.com.ar

RESUMEN: La calibración de radiómetros en general (y de fotovoltaicos en particular) debe ser revisada en aras de lograr que sea más representativa de las condiciones reales de funcionamiento del instrumento en cuestión. Se aborda en este trabajo la calibración segmentada, usándose tres constantes de calibración para un radiómetro fotovoltaico fabricado por CNEA. Las constantes son particulares de bandas específicas de irradiancia. La calibración aquí ensayada usando varios meses de datos para ello y dos meses de mediciones para el testeo de la misma, presenta una mejora respecto al desempeño del radiómetro del orden del 6%.

Palabra clave: Calibración, radiómetro solar, fotovoltaico, segmentación en irradiancia.

INTRODUCCIÓN

La calibración de un radiómetro es una actividad pautada, en líneas generales, por algunas de las normas específicas internacionalmente adoptadas como estándares de calibración. Podemos citar como ejemplo las normas ISO 9847 o ISO 9846. Ellas apuntan, en primera instancia, a la obtención de la sensibilidad del instrumento, sensibilidad que permite transformar su variable de salida (habitualmente un voltaje) en irradiancia en el rango electromagnético en que la radiación solar incidente en la superficie terrestre se distribuye.

Dicho de otra forma, la sensibilidad de un determinado radiómetro es μ , donde la relación entre la diferencia de voltaje (ΔV) entregado por el radiómetro y la irradiancia (Φ) que se pretende medir es:

$$\Phi = \frac{\Delta V}{\mu} \quad (1)$$

Las unidades de la sensibilidad μ habitualmente están dadas en $\frac{\text{microvoltios}}{\text{m}^2}$

La norma ISO 9847 especifica que, en relación con la precisión y exactitud de la determinación de las sensibilidades de calibración de un radiómetro calibrado en exteriores contra uno de referencia, debe ser tal que el desvío estándar sea menor al 0,5% (cerca del mediodía). Esta condición resulta restrictiva en condiciones de cobertura nubosa variable. También la norma restringe las mediciones durante días con cielos cubiertos a condiciones en que la media horaria de irradiación solar global sea mayor a 100 W/m². Este tipo de indicaciones va, en opinión de los autores, decantando las mediciones a aquellas que fueron realizadas bajo condiciones de cielos despejados con poca variabilidad horaria.

Por otra parte, el tratamiento de los datos obtenidos requiere descartar a aquellos que impliquen un desvío excesivo de la sensibilidad individual que determinan, respecto al valor promedio global de la sensibilidad.

Esta manera de proceder presenta ventajas, fundamentalmente en lo que hace al establecimiento de una normativa general del procedimiento de calibración, a la estandarización de las condiciones en que los datos de irradiación son obtenidos y a la evaluación de las incertezas. Su objetivo es doble: por un lado, determinar el procedimiento y, por otro, pautar la forma de obtener una **única** sensibilidad (o constante de calibración) que permita la conversión adecuada del voltaje en irradiancia.

No obstante, hay ciertas desventajas inherentes a esta manera de proceder que pueden sintetizarse en lo siguiente: la calibración bajo ciertas condiciones sumamente favorables y el descarte de datos relacionados con desvíos elevados, condicionan la sensibilidad obtenida a ser representativa de sólo un grupo particular de situaciones de irradiancia.

En efecto, calibrar con el Sol en ángulos cenitales relativamente menores, bajo condiciones de poca variabilidad de irradiancia, descartando datos que presenten mucha desviación, determina que la calibración del radiómetro puede no ser representativa de todas las condiciones en las que el mismo se empleará. Sin embargo, el radiómetro se usará, generalmente, para medir bajo distintas coberturas de cielo: despejado o cubierto total o parcialmente, con ángulos cenitales altos y pequeños, bajo temperaturas cambiantes, por citar solamente algunas de las variables posibles.

El presente artículo pretende presentar una vía posible para adaptar el procedimiento de calibración con vistas a considerar de manera más efectiva las condiciones de uso de un radiómetro fotovoltaico, posibilitando una prestación mejor.

Para ello, la primera modificación básica a analizar es tratar de usar, en vez de una sola sensibilidad para la calibración, varias de ellas. Cada una de estas sensibilidades se aplicará en un rango determinado de irradiancias (o valores de voltaje) del instrumental. De esta manera la selectividad indicada por la normativa para las condiciones de cielo bajo las cuales se calibra será reemplazada por una selectividad en la elección de la constante de calibración, representativa de las condiciones de irradiancia bajo las cuales se emplea el instrumento.

Esta propuesta para el procedimiento de calibración forma parte de una primera aproximación en el empleo de inteligencia artificial para la evaluación de la irradiancia solar, usando múltiples variables de entrada (voltaje del radiómetro como fundamental, pero también aquellas relacionadas, por ejemplo, con la posición del Sol) (James et al., 2013; Hastie et al., 2009; Zimmerman et al., 2018, Rooster 2005). Abordar una calibración, usando distintos juegos de constantes según el rango de irradiancia, constituye un primer paso en ese sentido.

MATERIALES Y MÉTODO

Se calibró un radiómetro fotovoltaico fabricado por CNEA N° G2021 04 (Bolzi et al. 1999; Bolzi et al. 2002), usando como referencia un radiómetro piranométrico CMP21, N° 149433, de la firma Kipp&Zonen. Ambos equipos se encuentran midiendo simultáneamente desde el 14 de diciembre de 2022 en la estación Luján de medición de radiación solar que el GERSolar administra en su predio de la UNLu (latitud= -34,58815; longitud= -59,06277). La salida de voltaje de ambos equipos es medida una vez por segundo, y los promedios minutales son almacenados en una tarjeta SD y simultáneamente grabados en una hoja de cálculo de Google Sheet, pudiéndoselos visualizar en tiempo real desde cualquier sitio que posea conexión a internet. El adquisidor de datos es el adquisidor DatIn, desarrollado por el GERSolar, de excelentes prestaciones.

Para realizar las calibraciones del radiómetro fotovoltaico y evaluar las diferencias entre sus mediciones y las del CMP21, se emplearon datos comprendidos en el período que se extiende entre el 14 de diciembre de 2022 y el 31 de marzo de 2023. Para testear los resultados de las calibraciones se usaron mediciones de ambos equipos realizadas entre el 1 de abril de 2023 y el 8 de junio de 2023. Cabe resaltar

que ninguno de los datos usados para testear las calibraciones fue empleado para calibrar. De esta manera la evaluación de desempeño, en el presente artículo, se realizó bajo la mecánica habitual de uso de los radiómetros calibrados: se los calibra y luego se mide con ellos. Evaluar de esta forma resulta, a nuestro juicio, más adecuada que otra mecánica usual, consistente en evaluar resultados calibrando con parte de los datos disponibles, dejando un porcentaje de ellos para el testeo de los modelos y luego promediando los resultados de múltiples selecciones de los conjuntos de datos tomados al azar. Proceder así conlleva el riesgo de apartarse del mecanismo habitual de calibración, por un lado. Por el otro, realizar la evaluación con una serie de datos que no hayan participado nunca del proceso de calibración y, además, pertenezcan a un período temporal distinto de aquellos usados para la determinación de la (o las) sensibilidad (sensibilidades) asegura un testeo de los resultados con un radiómetro bajo sus condiciones habituales de uso.

En principio, se analizaron los cocientes entre los voltajes entregados por ambos radiómetros: el piranométrico (CMP21) y el fotovoltaico (CNEA).

$$C_{pir/foto} = \frac{\text{Voltaje CMP21}}{\text{Voltaje fotovoltaico}} \quad (2)$$

Descartando valores extremos, representativos de situaciones correspondientes a muy bajos niveles de irradiancia solar, ese cociente varía entre 37 y 1,78. Los valores más altos del cociente corresponden a valores de irradiancia que son, en general, menores a 20 W. Aquí es esperable ese tipo de comportamiento, pues la respuesta de ambos radiómetros es significativamente diferente para irradiancias bajas. Por lo que, consideramos solamente aquellos valores del cociente que se correspondan a valores de irradiancia superiores a 50 W. Ese valor de corte implica descartar valores asociados a alturas solares menores a los 7° (para los cuales la irradiancia solar es baja), o a situaciones de muy baja irradiancia. Dado que los errores relativos (que surgen de la comparación entre lo medido por el piranómetro de referencia y el fotovoltaico) son elevados y representan un aporte de energía menor, resulta conveniente descartarlos, pues de ser considerados, su peso en la determinación de la constante asociada a bajas irradiancias sería elevado y la ganancia por considerarlos, pequeña.

Considerando ese universo para los datos analizados, encontramos que el cociente definido anteriormente se encuentra en el intervalo: (2,95; 1,78). Los valores más bajos del cociente se corresponden con valores altos de irradiancia (alrededor de 1000 W). El valor promedio del cociente es de 2,17 (promediando sobre todos los datos).

Es decir que los desvíos máximos del cociente respecto al valor promedio general son de aproximadamente (para sus valores mínimos y máximos) 17,8 % y 36,22%, respectivamente.

Este desvío, por lo tanto, no puede atribuirse a errores en la medición del voltaje del adquisidor de datos, o los errores asociados a los propios radiómetros. Da cuenta, en cambio, de un funcionamiento diferenciado del radiómetro fotovoltaico (tomando como parámetro de referencia el radiómetro piranométrico CMP21) en función de la irradiancia incidente sobre el mismo.

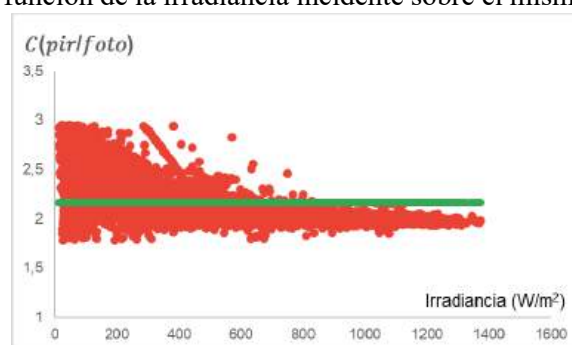


Figura 1: Cociente entre voltajes de los radiómetros CMP21 y Fotovoltaico, en rojo. En verde se muestra el valor medio de la serie de datos

Es por eso que la alternativa de realizar una calibración segmentada, determinando sensibilidades diferenciadas para diferentes rangos de voltajes de salida del fotovoltaico de CNEA, se revela como una solución para mejorar la calibración y, por ende, el desempeño del radiómetro.

RESULTADOS

Para proceder a comparar los métodos, se realizó en primer lugar una calibración considerando una única sensibilidad para todo el conjunto de valores. La sensibilidad determinada por este procedimiento (la que denominaremos $\mu_{estandar}$)

$$\mu_{estandar} = 17,2 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{w}{m^2}} \quad (3)$$

determinada con un error del 1,5%.

En la figura 2 se muestran los datos simultáneos: por un lado, el voltaje promedio minutil medido para el radiómetro fotovoltaico de CNEA; por el otro la irradiancia promedio minutil medida por el CMP21.

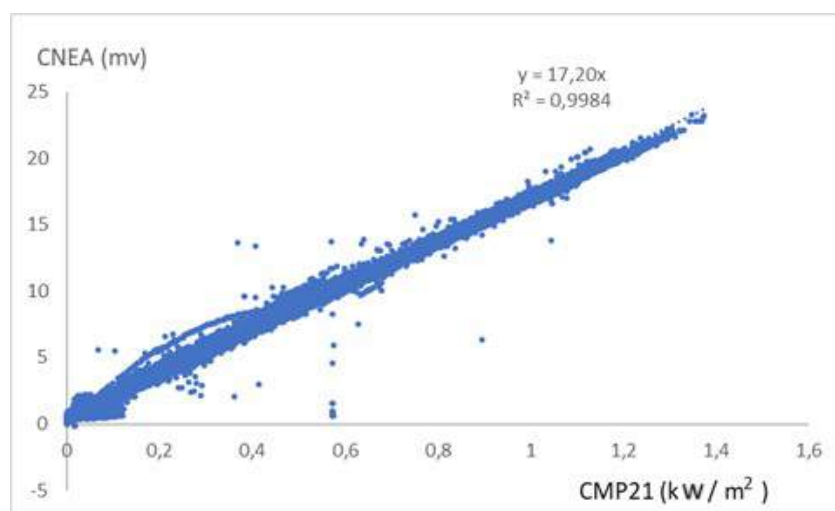


Figura 2: Calibración usual del radiómetro fotovoltaico de CNEA frente al CMP21

El desvío medio de los valores de irradiancia (definido como el promedio de la diferencia absoluta porcentual entre valores medidos por el CMP 21 y el sensor fotovoltaico) determinados para el fotovoltaico mediante la constante de calibración obtenida, fue de 21,7%, mientras que el sesgo promedio (la diferencia porcentual entre valores medidos por el CMP21 y el sensor fotovoltaico) fue de -20,8%. Esto se calculó para los propios datos usados para la calibración (con todos, sin hacer la selección que el procedimiento de calibración pauta). Mientras que el mismo desvío, calculado ahora con los datos usados para testear (desde el 1 de abril hasta el 8 de junio) fue de 26,8% y el sesgo -26,3%. Es posible que estos números parezcan demasiado altos, pero hay que considerar que los desvíos mayores ocurren en condiciones de muy baja irradiancia. En esas condiciones una diferencia entre la medición del CMP21 y el radiómetro fotovoltaico puede, porcentualmente, ser muy grande. Dado que los desvíos presentados son promedios sobre todo los valores, su peso en él es elevado. No obstante, su aporte energético es muy bajo, aportando poco a las horas de mayor irradiancia y a la radiación diaria.

Tomando esos valores como parámetros de referencia para la comparación, se procedió a realizar una calibración segmentada, determinando tres bandas de irradiancia para obtener tres constantes de calibración para el radiómetro fotovoltaico.

Las bandas de irradiancia (seleccionadas por una inspección visual de los datos) fueron:

Banda 1: (0 W/m²; 400 W/m²)
 Banda 2: (400 W/m²; 610 W/m²)
 Banda 3: (610 W/m²)

Cada uno de esos valores de irradiancia se corresponde con un voltaje específico del radiómetro fotovoltaico, por lo que también las bandas pueden ser dadas en función del voltaje del fotovoltaico de CNEA. Los valores elegidos como límites para la segmentación se seleccionaron arbitrariamente. Se trata de una decisión tomada por inspección visual del conjunto de datos considerados para la calibración. Para fundamentar esos valores elegidos de manera matemática, es necesario realizar un procedimiento de cálculo que estamos implementando para ser presentado en un trabajo futuro.

Realizando, entonces, tres calibraciones (una por banda) se obtuvieron las siguientes sensibilidades:

$$\mu \text{ Banda 1} = 18,36 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$\mu \text{ Banda 2} = 17,65 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$\mu \text{ Banda 3} = 16,99 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Todas las constantes fueron determinadas con un error del 1,5%.

La figura N° 3 muestra los gráficos de las calibraciones segmentadas por bandas de irradiancia. La figura N° 4 el gráfico comparativo entre las irradiancias medidas con el CMP21 y las calculadas con el radiómetro fotovoltaico, aplicando la calibración segmentada a los datos de testeo.

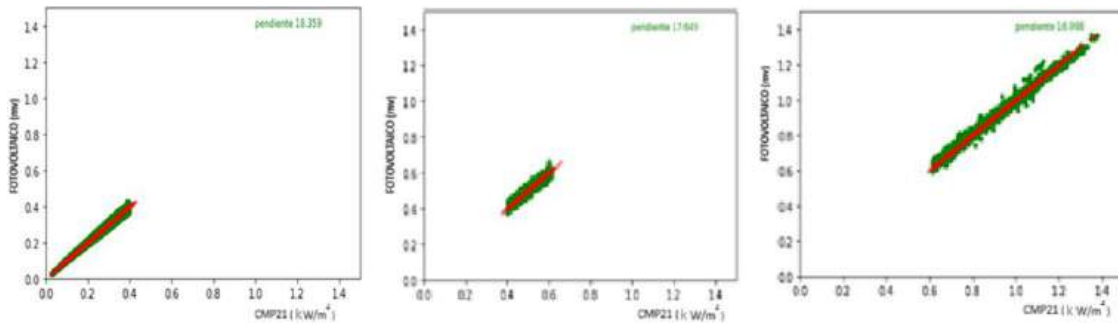


Figura 3: Gráficos correspondientes a las calibraciones en las tres bandas seleccionadas.

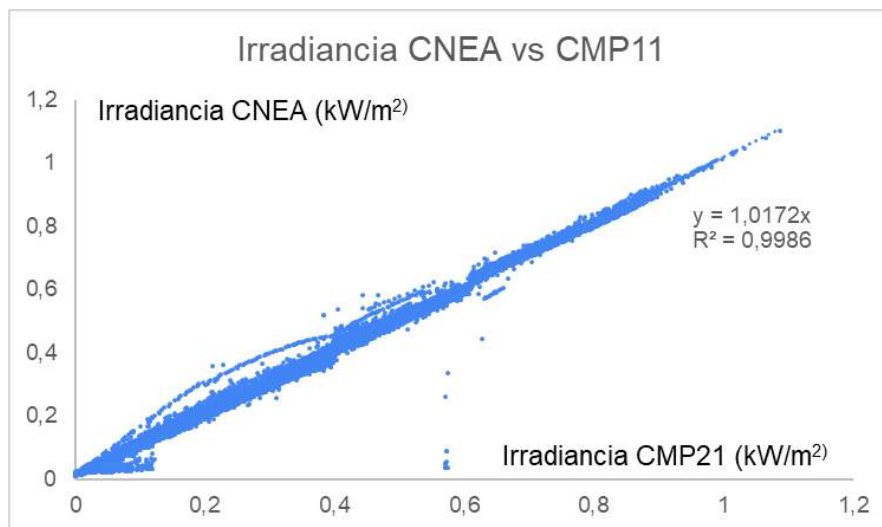


Figura 4: Irradiancia del radiómetro fotovoltaico calibrado segmentadamente frente al CMP21

La comparación entre el desempeño de la calibración usual del fotovoltaico con sólo una constante de calibración y la calibración segmentada, revela un error menor para esta última. La comparación se realizó, con los datos reservados para testear.

En efecto, usando esos datos, mientras que el error medio para la energía calculada para el fotovoltaico con la calibración usual, tal como se mostró anteriormente, fue del 26,8% y su sesgo -26,3%, mientras que, los errores medio y el sesgo, para la calibración segmentada, fueron 20,7% y -19,6 %, respectivamente.

Estas diferencias son significativas y justifican, a nuestro juicio, el procedimiento llevado adelante.

Se repitió el procedimiento y las comparaciones respectivas, con la estación que el GERSolar opera en Armstrong. Los datos analizados corresponden a mediciones simultáneas de dos radiómetros: un CMP11 y un fotovoltaico de CNEA, bajos las mismas condiciones de almacenamiento de datos que se dieron en la estación Luján. Se aplicaron allí también tres constantes de calibración para comparar el desempeño del radiómetro fotovoltaico calibrado con ellas frente a una calibración usual. Se calibró con datos minutales entre el 31 de marzo de 2023 y el 30 de abril de 2023. Se testeó con datos tomados entre el 1 de mayo y el 4 de julio de 2023. Se repitió aquí un comportamiento similar del radiómetro fotovoltaico comparado con el piranométrico. La calibración segmentada mejoró un 2% el error promedio y el sesgo con los datos de la propia calibración, pero no aportó diferencias significativas con la calibración usual cuando se analizaron los datos de testeó. No podemos determinar, hasta el momento, las causas de este comportamiento. No queda claro aún con el volumen de datos que se analizaron si esto se debe a alguna situación particular relacionado con la radiación solar en ese sitio en el período de testeó seleccionado, o a alguna característica **propia** del radiómetro que se encontraba midiendo simultáneamente con el CMP11. Se ve para el cociente entre los voltajes de los radiómetros CMP21 y Fotovoltaico instalados en Armstrong, un comportamiento similar al mostrado en la figura N°2 para la estación Luján, pero, según se explicó, no hay una mejora del comportamiento del fotovoltaico mediante su calibración segmentada. Un seguimiento durante un período más prolongado ayudará a determinar la causa de estas diferencias. De igual manera, la determinación de los límites de la segmentación mediante un proceso de cálculo no arbitrario permitirá entender mejor las condiciones requeridas para su aplicabilidad.

CONCLUSIONES

La respuesta (en voltaje) a la irradiancia de un sensor solarimétrico fotovoltaico como el construido por CNEA presenta una variabilidad tal que permite inferir un funcionamiento diferenciado en función de dicha irradiancia.

En tal sentido, una calibración segmentada en irradiancia se presenta como una alternativa válida para mejorar la prestación de un radiómetro fotovoltaico y constituye un primer paso en el empleo del aprendizaje de máquina en el cálculo de la irradiancia brindada por un radiómetro en función de múltiples variables. En el ensayo realizado, reservando datos que no se usaron para la calibración para el testeó del procedimiento, se encontró una disminución significativa (aproximadamente el 6%) del error medio en el desvío (respecto al radiómetro CMP21 tomado como referencia) comparada con una calibración usual que emplea sólo una constante con los equipos presentes en la estación Luján. La mejora fue menor con datos provenientes de un sensor fotovoltaico y uno piranométrico en la estación Armstrong.

El uso de varias constantes de calibración no supone ninguna complicación grave en el cálculo de la irradiancia del sensor ni en el tratamiento de los datos, habida cuenta de las capacidades computacionales existentes hoy día, de la facilidad de programación de los adquirentes de datos o de la existencia de microcontroladores programables de forma sencilla, para realizar los cálculos con tres constantes en lugar de una.

El precio a pagar en ese sentido, es muy bajo frente a la mejora en las capacidades de medición del radiómetro en cuestión.

No puede obviarse, como conclusión más general, la necesidad, a nuestro juicio, de hacer una revisión crítica de los procedimientos de calibración recomendados, habida cuenta del avance tecnológico presente, las facilidades computacionales actuales y la necesidad de abordar los nuevos mecanismos de aprendizaje de máquina aplicados al instrumental destinado a medir la radiación solar.

REFERENCIAS

- Bolzi C.G., Durán J.C., Dursi O., Renzini G. y Grossi Gallegos H. (1999) Construcción y ensayo de piranómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA. AVERMA 1 pág. 4.8.
- Bolzi C.G., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6, 11.01.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction (Vol. 2, pp. 1-758). New York: springer.
- Norma ISO 9846 (1992). Solar Energy: Calibration of a pyranometer using a pyrliometer.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning (Vol. 112, p. 18). New York: springer.
- Norma ISO 9847 (1992). Solar Energy: Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer.
- Rooster R. (2005) High performance calibrations under cloudy sky conditions. Developments in solar engineering, Vol 56, N° 3. Pp 211-223.
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., ... & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. Atmospheric Measurement Techniques, 11(1), 291-313.

CALIBRATION OF A SEGMENTED PHOTOVOLTAIC RADIOMETER ACCORDING TO IRRADIANCE

ABSTRACT: The calibration of radiometers in general (and of photovoltaics in particular) should be reviewed in order to make it more representative of the actual operating conditions of the instrument in question. Segmented calibration is addressed in this work, using three calibration constants for a photovoltaic radiometer manufactured by CNEA. The constants are specific to specific irradiance bands. The calibration tested here using several months of data for it and two months of measurements for testing it, presents an improvement with respect to the performance of the radiometer of the order of 6%.

Keywords: Calibration, solar radiometer, photovoltaic, irradiance segmentation

CONSTRUCCIÓN DE UN ADQUISIDOR DE DATOS SOLARIMÉTRICOS *ONLINE* CONFIABLE Y DE BAJO COSTO

Raúl Righini, Julián A. Lell, Pablo E. Ruiz, Sebastián Bazán

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), Instituto de Ecología y Desarrollo
Sustentable (INEDES) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) -
Universidad Nacional de Luján (UNLu)

Tel. 02323-440241– e-mail: raulrighini@yahoo.com.ar

RESUMEN: Las redes de medición de magnitudes físicas asociadas a la radiación solar (en particular la irradiancia global en plano horizontal) requieren habitualmente un presupuesto significativo destinado a la adquisición de instrumentos y al pago de logística y maniobras de instalación en campo. La compra de equipos debe contemplar, además de radiómetros, un sistema de adquisición de datos capaz de digitalizar y almacenar las señales analógicas correspondientes a la irradiancia solar. La conectividad de los adquirentes a una red de datos supone un costo adicional debido a la necesidad de periféricos específicos. En el presente artículo se describe el funcionamiento de un adquirente de datos desarrollado por el GERSolar, de desempeño confiable y bajo costo, el cual permite digitalizar valores de irradiancia y subirlos en tiempo real a un servicio gratuito de almacenamiento en la nube.

Palabras clave: irradiación solar, adquirente de datos, almacenamiento en la nube.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de adquisición de datos destinados a digitalizar y almacenar datos empíricos (en particular los obtenidos a través de radiómetros solares desplegados en campo) constituyen una parte imprescindible del sistema de medición; es en dicho “sistema” que el radiómetro, la representatividad del sitio de emplazamiento, el mantenimiento planificado y los sistemas de adquisición y procesamiento de datos se constituyen como conjunto de piezas interdependientes, en el cual el correcto funcionamiento de cada elemento es vital para la correcta evaluación del recurso solar.

El adquirente de datos, siendo el elemento encargado de registrar los valores de tensión eléctrica provenientes del radiómetro, debe cumplir varios requisitos para que los procesos de medición, digitalización y almacenamiento de la magnitud física tengan el nivel de calidad requerido para acotar el error asociado a estos datos y ajustarse así a las tolerancias admitidas para la medición de la irradiancia solar con fines científicos.

Si bien el mercado ofrece una gran variedad de adquirentes de datos muy desarrollados y confiables, capaces de satisfacer los requisitos exigidos para las mediciones solarimétricas, los mismos presentan dos características que pueden limitar su uso extendido: en primer lugar, la dificultad y especificidad relativa a su programación y, en segundo lugar, su costo relativamente elevado (comparable o superior al del piranómetro, elemento principal del sistema de medición).

Como alternativa a los modelos comerciales actualmente existentes, se diseñó y construyó un adquirente de datos basado en un microcontrolador moderno de costo reducido, asociado a una unidad GPS para la determinación de la hora exacta, un módulo ADC (*analog to digital converter*) independiente para digitalización de señales analógicas y una unidad de grabación en tarjeta SD.

MATERIALES Y MÉTODO

La plataforma de *hardware* seleccionada ha sido la placa de desarrollo ESP32 S2 (www.espressif.com). Dicha placa cuenta con un microcontrolador de 32 bits de doble núcleo capaz de operar a una frecuencia

de reloj de 240 MHz, integrando también una memoria flash de 4 MB, conversores analógico digitales (ADC) y digital a analógico (DAC, *digital to analog converter*), puertos de entrada/ salida digitales y una antena de Wi-Fi incorporada, que opera a Wi-Fi de 2,4 GHz, y que le permite conectividad con una red de área local inalámbrica (WLAN).

Los ADC de la placa ESP32 son de 12 bits, y dado que la tensión máxima con la que opera su electrónica es 3,3 V, la resolución máxima que puede obtenerse es de solo 0,8 mV, lo que resulta insuficiente para digitalizar la señal proveniente de piranómetros analógicos cuyas tensiones máximas rondan los 10-12 mV. Debido a que es necesario tener una resolución superior a los valores mencionados para trabajar con este tipo de radiómetros, se optó por usar un ADC adicional (ADS1115), que cuenta con dos canales diferenciales de 16 bits. Dado que uno de los bits se usa para el signo de la señal digitalizada, quedan disponibles 15 bits para subdividir los niveles de tensión; este ADC incorpora también un amplificador de ganancia programable, lo que en su conjunto permite una resolución máxima de 0,0078 mV, más que suficientes para los fines solarimétricos del adquisidor en cuestión. La máxima tensión admisible por canal es, para el mayor rango configurable, de 3500 mV (www.ti.com) y los valores pueden ser tanto positivos como negativos. Todo el adquisidor puede ser alimentado a través de una tensión continua de 5V. En el caso de los adquisidores construidos por nuestro grupo, dicha tensión se obtiene a través del cable de alimentación/ programación de la placa ESP32, obtenida mediante una fuente de 5V de uso común para la recarga de teléfonos celulares.

La fecha y hora necesarias para datar los datos de irradiación solar, obtenidos a través de un módulo GPS Neo6 Ublox (www.u-blox.com), son enviadas periódicamente a la placa ESP32 mediante una conexión serial. La unidad grabadora/ lectora de tarjeta SD es empleada para almacenar todos los valores digitalizados, cumpliendo una función de respaldo y buffer de los datos que serán subidos a la nube. Los componentes del sistema y su interconexión se encuentran representados en la Figura 1.

Dado que la placa ESP32 está garantizada para su uso continuo por al menos 12 años (<https://www.espressif.com/en/products/longevity-commitment>), que las tarjetas SD garantizan su uso continuo por al menos 10 años y que las unidades GPS como las empleadas se garantizan por al menos 8 años de uso continuo, consideramos que el adquisidor construido deberá superar los 8 años de vida útil, con expectativas ciertas de superar, la mayoría de las veces, los 10 años de funcionamiento.

El adquisidor se programa (más adelante se explicará cómo) con una ventana de muestreo determinada. El módulo ESP32 registra valores numéricos una vez por segundo, aproximadamente, hasta alcanzar un número de mediciones adecuado para la ventana establecida, y luego obtiene el valor medio correspondiente a este conjunto de valores. Seguidamente, los datos son almacenados en la tarjeta SD y subidos a la red por medio del enlace Wi-Fi, almacenándose en una planilla GoogleSheet (servicio online gratuito de Google LLC), que por sus características puede ser configurada para graficar los datos, promediarlos, etc., con todas las facilidades que este tipo de herramienta permite. La dirección a la que se suben los datos es obtenida desde un *script* específicamente escrito en la planilla; este *script* es configurado para representar los datos medidos en mV (en ambos canales del adquisidor), y la fecha y hora correspondientes a cada promedio almacenado. Los datos minutales así subidos están desde ese momento disponibles para ser consultados desde cualquier sitio donde se cuente con una conexión a internet.

En lo que se refiere a la interfaz de usuario física, la placa ESP32 cuenta con un indicador LED, el cual es utilizado para brindar información sobre dos eventos: conexión a la red wifi y estado de medición. Cuando el adquisidor busca la red configurada, el LED parpadea rápidamente; se realizan 3 series de 50 intentos de conexión, y al finalizar cada serie el adquisidor se reinicia automáticamente para realizar un nuevo intento. Si luego de las 3 series no se logró la conexión, el adquisidor comienza la rutina de medición almacenando los datos en la tarjeta SD que posee. Cuando la secuencia de medición comienza (una vez recibida señal de la unidad GPS, lo cual es indicado por un led propio de la unidad), el LED modifica su frecuencia de parpadeo, quedando establecida la misma en 1Hz.

En horarios prefijados, el adquisidor verifica si hay datos en espera para ser subidos a la nube. En caso afirmativo, el adquisidor sube los datos pendientes y luego continúa con la rutina estándar de mediciones programada. De esta forma, el adquisidor procura que toda la información almacenada se encuentre

siempre disponible en línea. Si se pierde la conectividad a internet, los datos serán subidos en cuanto la misma sea reestablecida.

La filosofía de diseño del adquisidor tuvo como ejes fundamentales la simplificación del proceso de programación (interfaz de usuario por *software*) y la confiabilidad del sistema de comunicación, de manera que los datos estén disponibles en los intervalos prefijados por los parámetros de configuración.

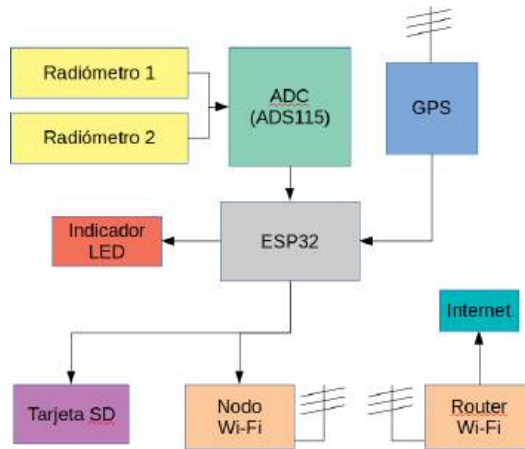


Figura 1: Elementos del sistema e interconexiones.

En la Figura 2 (A, B y C) se presentan los diagramas de flujo para distintas rutinas asociadas a la conectividad Wi-Fi, lectura del módulo GPS, toma de muestras, almacenamiento y subida de datos.

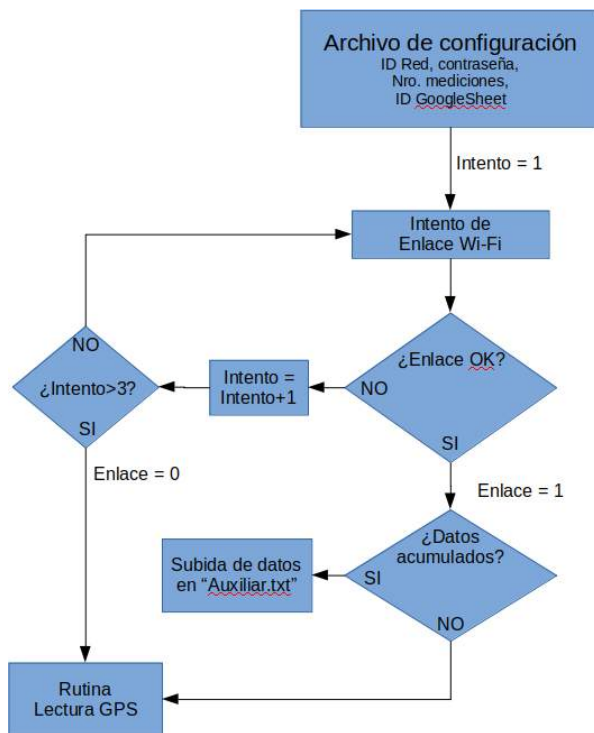


Figura 2A: Esquema del programa, inicio y enlace Wi-Fi.

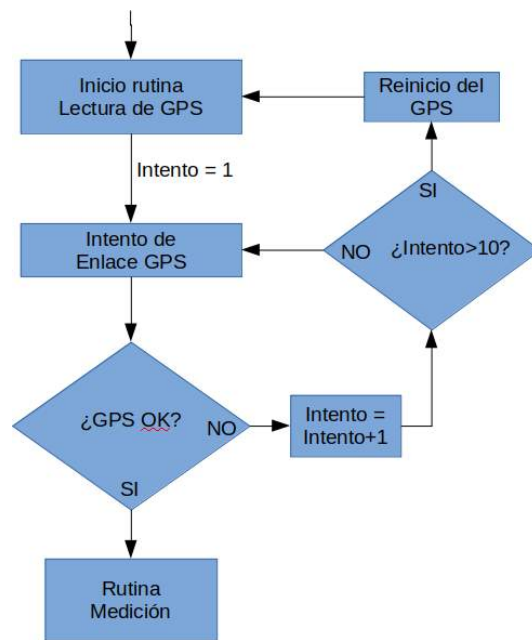


Figura 2B: Esquema del programa, rutina de lectura GPS.

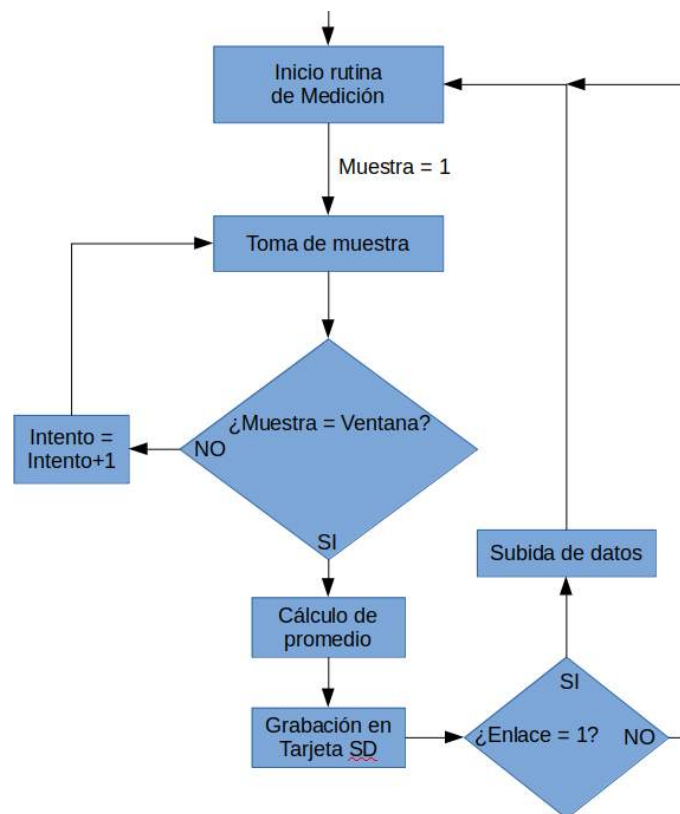


Figura 2C: Esquema del programa, rutina de medición, promedio, almacenamiento y subida de datos.

PROGRAMACIÓN DE USUARIO

Con el objetivo de simplificar al máximo el proceso de configuración del adquisidor, dicho proceso consiste en la generación de un único archivo de texto sin formato (denominado: “config.txt”), grabado previamente en la tarjeta SD, el cual debe escribirse en una PC estándar con programas simples (tales como Notepad, Gedit, Nano, Vim, etc.); este archivo debe contener únicamente cuatro líneas:

- **Nombre de la red Wi-Fi a la que se conectará el adquisidor.**
- **Contraseña de la red Wi-Fi.**
- **Dirección privada de la planilla a la que se subirán los datos (GoogleSheet).**
- **Cantidad de mediciones que habrán de promediarse (1 med./ s).**

A continuación, se presenta un ejemplo del archivo de configuración (“config.txt”):

```
unlu_Campo-Ed.Gersolar
sol3s98
AKfycbyyTREEIHL-Dd1niqUfTO7OTH2pgeMOXMVwiaGPKpJbZifmp42uRVKvz3XtYkkf47HBIQ
60
```

En el caso de que la red Wi-Fi no tenga una contraseña, la línea correspondiente debe dejarse en blanco.

Seguidamente, se muestran, a modo de ejemplo, los datos subidos a la red por la placa, los cuales son tomados por el *script* de GoogleSheet y presentados en la planilla tal y como ejemplifica la siguiente tabla. El formato de fecha y hora es establecido por el *script* escrito para esa hoja, para ser presentado de manera compatible con el formato utilizado internamente en el GERSolar.

Tabla 1: Ejemplo del archivo de salida del adquisidor.

fecha	mv1	mv2	metaParam	metaValue
2022-12-14 14:10:03	8,54	16,99	estación	Lujan
2022-12-14 14:11:14	8,45	16,81	latitud	-34,58815
2022-12-14 14:12:32	8,38	16,67	longitud	-59,06277
2022-12-14 14:13:47	8,37	16,64	altitud	29
2022-12-14 14:14:59	8,28	16,5	gmt	-3
2022-12-14 14:16:18	8,24	16,39	datalogger	DatIn
2022-12-14 14:17:35	8,25	16,44	dataloggerSerie	2203
2022-12-14 14:18:54	8,22	16,35	mv1Sensor	CMP21
2022-12-14 14:20:07	8,22	16,37	mv1Serie	149433
2022-12-14 14:21:24	8,22	16,35	mv1Cte	8,51
2022-12-14 14:22:35	8,27	16,47	mv2Sensor	Global CNEA
2022-12-14 14:23:46	8,28	16,51	mv2Serie	G2021 04
2022-12-14 14:25:00	8,26	16,48	mv2Cte	16,97
2022-12-14 14:26:15	8,18	16,31	Canales	2

Los datos así obtenidos, pueden ser tratados luego para transformarlos en irradiancia incidente sobre el plano de ubicación del radiómetro, simplemente dividiendo cada valor por la sensibilidad del instrumento.

El sistema de subida de los datos a la nube, basado en la herramienta GoogleSheets, permite obtener la mayoría de las funcionalidades de una hoja de cálculo de manera que resulta posible calcular valores medios, integrales, y realizar gráficos de los valores de irradiación actuales y acumulados, entre otras opciones.

ANÁLISIS SOBRE LA MEDICIÓN DE TENSIÓN

Se compararon las mediciones brindadas por el adquisidor con las de un multímetro de banco marca Owon modelo XDM104. Para hacerlo se utilizó una fuente de tensión continua regulable, midiéndose simultáneamente su salida con el multímetro de banco y con el adquisidor, para distintos valores de voltaje establecidos. Se promediaron las mediciones para los dos instrumentos, obteniéndose datos minutales para ambos. Los resultados de las mediciones pueden verse en la figura 3. El error absoluto promedio (tomando como referencia las mediciones del multímetro de banco) fue del 0,32%, mientras que el sesgo promedio fue de -0,32%. La pendiente al origen de la recta de regresión lineal fue 0,9965 y su ordenada al origen 0,0831. El coeficiente de regresión lineal fue muy cercano a 1. El análisis de regresión revela una muy buena linealidad entre las mediciones; al ser el sesgo negativo, pero igual en módulo al error absoluto, sugiere que el adquisidor de GERSolar puede ser fácilmente ajustado para mejorar su prestación simplemente sumando por *software* la ordenada al origen a los datos promediados.

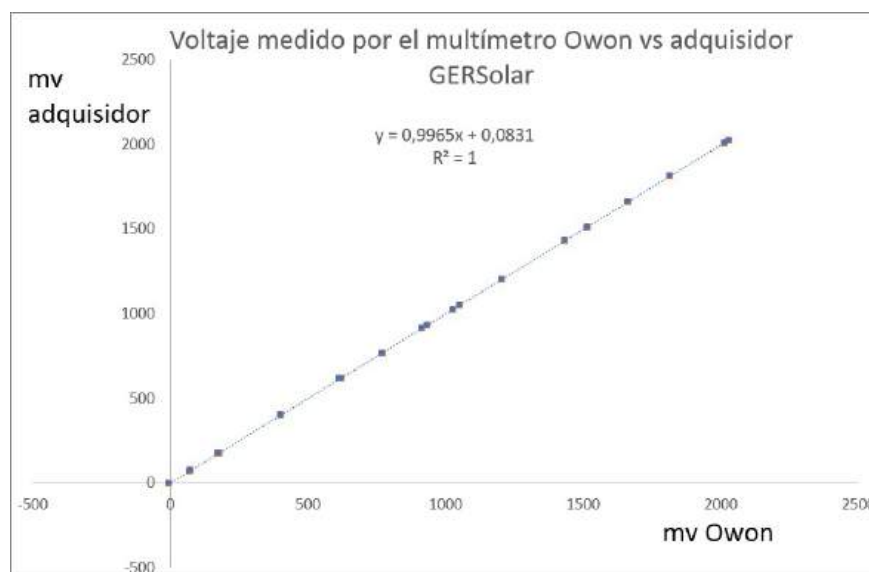


Figura 3: mediciones simultáneas del multímetro de banco y el adquisidor.

COMPATIBILIDAD CON OTROS ADQUISIDORES DE DATOS

Con el objetivo de analizar la compatibilidad del adquisidor desarrollado por el GERSolar con otros adquisidores de datos, se comparó el primero con un adquisidor Campbell Scientific modelo CR800. Ambos instrumentos midieron simultáneamente la señal proveniente de un radiómetro Kipp & Zonen modelo CMP11 durante dos días de noviembre de 2022, en la estación de medición de radiación solar que el GERSolar opera en el predio de la Universidad Nacional de Luján.

La comparación directa de los datos minutales no es sencilla, ya que la base temporal que tienen ambos adquisidores es distinta. En efecto, el adquisidor desarrollado toma datos cada 1 segundo, aproximadamente, promediando los datos cada 60 mediciones. Posteriormente, el proceso de carga de los datos en la red requiere un tiempo que puede variar, dependiendo del estado de la conexión del enlace Wi-Fi y de la velocidad del proveedor de acceso a internet. Por este motivo los promedios calculados pueden desfasarse respecto a los tomados en minutos exactos por el adquisidor CR800. Para que la comparación pueda ser realizada es necesario minimizar este efecto, y es por eso que se recurre a los promedios horarios, donde el mencionado desfasaje reviste menor importancia.

Los gráficos de las comparaciones entre promedios horarios muestran una muy buena correlación lineal entre los promedios del CR800 y del adquisidor desarrollado. El valor de los coeficientes de correlación $R^2 = 0,9996$ en ambos casos lo muestra. En la figura 4 se muestran los resultados para ambos canales del adquisidor desarrollado.

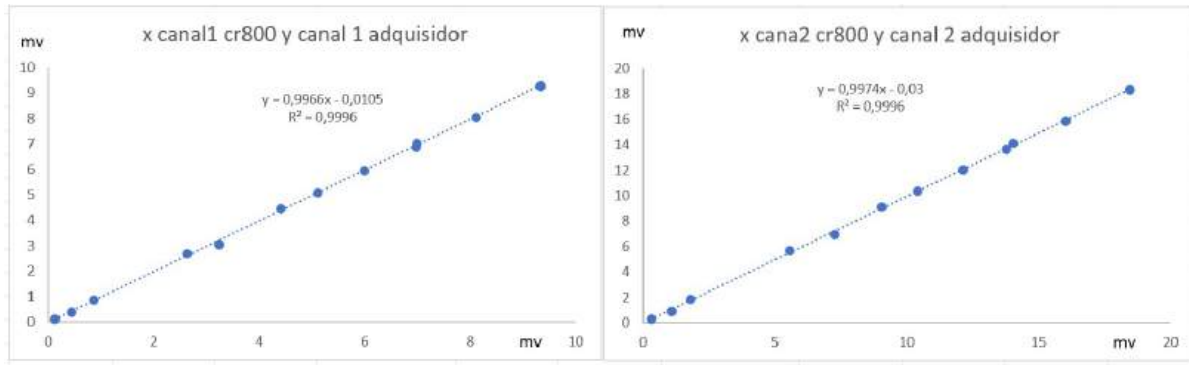


Figura 4: Desempeño del adquisidor desarrollado para el registro de promedios horarios, en referencia a un adquisidor Campbell Scientific CR800. Las diferencias porcentuales promedio fueron de 1,07% para el canal 1 y 1,15% para el canal 2.

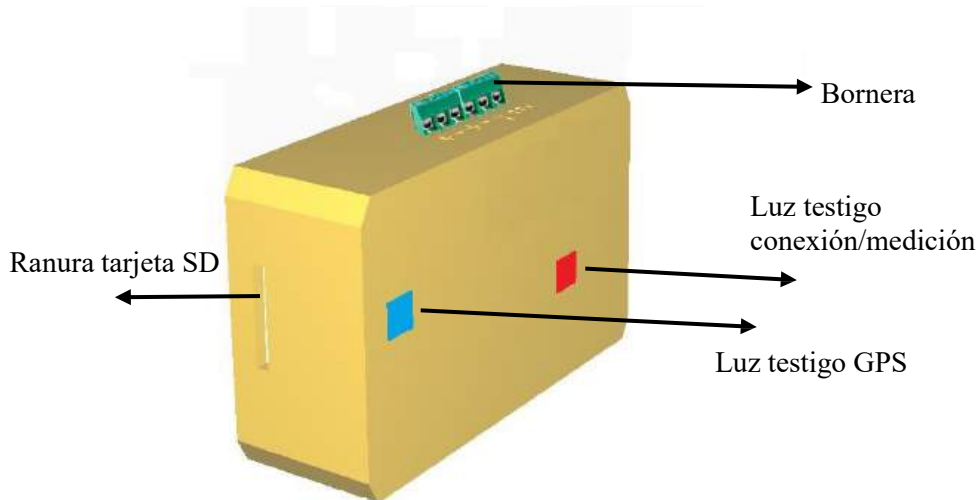


Figura 5: Representación del adquisidor desarrollado. Nótese que el instrumento presenta luces testigo para informar sobre el estado de conexión, medición en curso y disponibilidad de la señal de GPS.

CONCLUSIONES

La construcción de un adquisidor de datos de dos canales, confiable y de bajo precio, se revela como una alternativa viable en vistas a dotar de este tipo de instrumental a estaciones solarimétricas. El adquisidor desarrollado ha demostrado un buen funcionamiento durante los ocho meses que lleva en funcionamiento en la estación Luján y los seis meses de instalación en la estación Armstrong. Un error esporádico se presenta cuando el adquisidor sube datos pendientes a la red. En muy pocas ocasiones se pierde la fecha y hora del primer dato subido. No obstante, la baja frecuencia de aparición de ese error (un minuto cada dos o tres días) permite directamente eliminar el dato de ese minuto particular sin que ello represente una pérdida de sensible de información.

Durante este período considerado, el adquisidor ha brindado mediciones de tensión de bajo error para señales provenientes de radiómetros, presentando también la posibilidad de acceder a los datos en tiempo real a través de internet. Esta última no es una característica menor, habida cuenta de la necesidad

de que las mediciones de irradiancia estén disponibles de forma inmediata, a fin de ser empleadas en algoritmos de pronóstico de la radiación solar a corto plazo.

El resultado de la comparación de las prestaciones del adquisidor desarrollado con un adquisidor comercial profesional demuestra que el uso del primero es una alternativa válida, dado su bajo costo, la facilidad de su configuración y la capacidad de subir datos a la nube.

REFERENCIAS

Sistemas Espressif

Dirección URL: <https://www.espressif.com/en/support/download/other-tools?keys=&field_type_tid%5B%5D=624/>

Texas Instruments

Dirección URL: <<https://www.ti.com/product/ADS111/>>

u-blox

Dirección URL: <<https://www.u-blox.com/en/>>

BUILDING A RELIABLE AND LOW-COST ONLINE SOLARIMETRIC DATALOGGER

ABSTRACT: Parameter measurement networks associated with solar radiation (particularly global radiation) usually entail high installation costs, associated, in addition to the specific cost of the radiometers, to the value of the data collectors in charge of storing the information. Connecting the loggers to a data transmission network also implies an additional cost associated with the peripherals required for this purpose. This article describes the operation of an acquirer developed by GERSolar, with good performance and low cost, which allows digitizing the data provided by a radiometer and uploading them to the network in order to monitor radiation levels in real time.

Keywords: solar energy, solarimetry, datalogger.

AVANCES EN LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES GOES-16

R. Ledesma¹, G. Salazar¹, O. Vilela²

¹Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

²Departamento de Energía Nuclear, Centro de Tecnología, Universidad Federal de Pernambuco

E-mail: rdledesma@exa.unsa.edu.ar

RESUMEN: La estimación de la irradiancia solar a través de imágenes satelitales es una forma eficiente de conocer la radiación solar en grandes áreas geográficas, ya que los satélites pueden capturar datos regularmente a intervalos predeterminados durante largos periodos, constituyendo una base de información extensa en el tiempo y el espacio a los fines del monitoreo climático. En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre la estimación de la irradiancia solar en las provincias de Salta y Jujuy utilizando imágenes del satélite GOES-16. Se evalúan dos modelos simples basados en un índice de nubosidad aplicados sobre imágenes del satélite GOES-16 para estimar la irradiación solar en 3 sitios ubicados en las provincias de Salta y Jujuy.

Palabras clave: energía solar, GOES 16, SUNY, cano

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de generar electricidad a escala industrial utilizando fuentes de energía renovables parece una opción importante para mitigar la contaminación y la inyección de gases de efecto invernadero en la atmósfera y limitar las consecuencias del cambio climático (IPCC, 2022). Centrándonos en la energía solar, y más concretamente en la conversión fotovoltaica (FV), la producción de energía eléctrica generada por plantas solares está directamente relacionada a la magnitud del recurso solar disponible, y se ve directamente afectada por sus características espacio-temporales, como la variabilidad en diversas escalas temporales. Es necesario un análisis económico detallado para decidir si un proyecto de gran central eléctrica es viable desde el punto de vista financiero en un emplazamiento concreto. Entonces, obtener una base de datos estadísticamente representativa del recurso solar (en este caso en términos de irradiancia horizontal global, GHI) es esencial para preparar el diseño, dimensionamiento y simulación de generación de energía para poder evaluar su financiabilidad (Vignola et al., 2012). Disponer de información sobre los recursos a partir de modelos de radiación (empíricos o físicos) o de bases de datos que utilicen, por ejemplo, observaciones por satélite, es necesario para realizar análisis de prefactibilidad y preparar un buen diseño del sistema (Huld et al., 2012; Ayompe y Duffy, 2014; Drews et al., 2008; Salazar et al., 2017). Esto se debe a que rara vez se dispone de mediciones de alta calidad en el lugar de interés, a pesar de que son insustituibles para reducir las incertidumbres y realizar estimaciones fiables del nivel de riesgo económico (Sengupta et al., 2021). En el mejor de los casos, estas observaciones de calidad local sólo están disponibles durante periodos cortos, que pueden utilizarse para realizar una “adaptación al lugar” de los datos modelizados a largo plazo (Polo et al., 2016). Este procedimiento reduce la incertidumbre de los datos modelizados de los recursos, que de otro modo no se considerarían financieros. Debe resaltarse que este conocimiento adquirido a través de las imágenes satelitales no solo es útil para la

generación de energía FV, sino que también para otras ramas, como la agricultura (Cao et al., 2022) y el monitoreo ambiental (Volante et al., 2012). En la República Argentina la falta de estaciones radiométricas con mediciones sistemáticas, protocolizadas y con tiempos significativos de funcionamiento hizo que el desarrollo de modelos satelitales autóctonos fuera complicado. Sin embargo, existen en el Noroeste Argentino (NOA) estaciones con largo tiempo de medición y con protocolos de mantenimiento (Salazar et al., 2021) y se han comenzado a analizar los datos provenientes de las estaciones INTA ENARSOL (Moltoni et al., 2016). Sin embargo, el desarrollo de modelos exige primero conocer los existentes, iniciando este estudio por los más sencillos. Entre estos se encuentran SUNY (Perez et al., 2002b) y el denominado modelo de (Cano et al., 1986). Así, en este trabajo se analizan los resultados preliminares al aplicar estos modelos a datos satelitales obtenidos usando imágenes GOES 16 del canal 2, correspondientes a la región espectral entre 400 y 700 nm, es decir el canal visible (visible por el ojo humano medio), y comparando las estimaciones de los mismos contra valores medidos de GHI en esos sitios.

El objetivo de este trabajo es evaluar dos modelos simples basados en el índice de nubosidad aplicados sobre imágenes del Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES por sus siglas en inglés), en su versión 16, (GOES-16) para estimar la irradiación solar en dos sitios ubicados en la provincia de Jujuy y un sitio ubicado en la provincia de Salta.

Tabla 1: Sitios de estudio.

Estación	Provincia	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (metros s.n.m)
AP	Jujuy	-22.80205	-65.82436	3459
CE	Salta	-24.89438	65.47105	1235
YU	Jujuy	-23.58447	-64.5066	401

En la Tabla 1 se describen los datos de cada uno de los sitios de estudio. Valores negativos de latitud y longitud representan el sur desde el ecuador y este desde el meridiano de Greenwich respectivamente. La estación AP se encuentra en la ciudad de Abra Pampa.

Las estaciones AP y YU se encuentran situadas en la provincia de Jujuy, en las ciudades de Abra Pampa y Yuto correspondientemente, la estación CE se encuentra ubicada en la ciudad de Cerrillos de la provincia de Salta. Las tres estaciones pertenecen a la red del Sistema Argentino de Evaluación de Energía Solar (ENARSOL) (Moltoni et al., 2016), que se encuentra a cargo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) <https://www.argentina.gob.ar/inta>.

La red ENARSOL es un proyecto creado para medir la radiación solar en diferentes regiones de Argentina. Fue lanzado en 2015 por un consorcio público-privado conformado por el INTA, la Universidad Nacional de Luján (UNLu) y Y-TEC. El proyecto fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC). El objetivo principal de este proyecto era instalar 32 estaciones de medición de radiación solar en distintas regiones climáticas del país, con el fin de evaluar el recurso solar disponible en cada una de ellas.

Fuentes de datos en tierra

Para este trabajo se dispusieron de valores medidos de irradiancia solar global (GHI por sus siglas en inglés) medidas cada un minuto mediante un piranómetro CMP11 correspondiente a una estación completa de monitorización solar SOLYS-2. Las mediciones contemplan los periodos correspondientes a los años 2018 para YU y 2019 para AP y CE. Ambas estaciones son operadas y mantenidas por el INTA.

Los datos minutales fueron sometidos al control de calidad (QC) para la GHI propuesto por (Nollas et al., 2023), donde se aplican tres filtros determinados empíricamente. Además, se filtraron las muestras

cuyo correspondiente valor de altura solar es menor a 7° . Además, los valores que pasaron el proceso de control de calidad fueron integrados en periodos de una hora siguiendo un procedimiento explicado (Salazar et al., 2020) donde se trabajó sobre la integración temporal de serie de datos. En este proceso los promedios horarios se tomaron solo en las horas donde se disponían al menos quince muestras luego del proceso defiltrado.

Tabla 2: Descripción de los Filtros del QC

Filtro	Descripción
F1	$GHI < 1.5SE1361.7(\cos(SZA))^{1.2} + 100 W/m^2$
F2	$GHI > (6.5331 - 0.065502SZA + 1.8312E - 4SZA^2)/(1 + 0.01113SZA)$
F3	$kt < 1.4 \ \& \ \alpha < 7^\circ$

La Tabla 2 describe los filtros utilizados en donde S es el factor de corrección de la distancia Tierra-Sol, E es la constante solar, kt es el índice de claridad adimensional y α es la altura solar expresada en grados.

Tabla 3: Resultados del QC

Estación	Valores Diurnos	F1	F2	F3
AP	229342	229342	224086	209230
CE	202261	202261	192137	182771
YU	153016	153016	147871	138660

La Tabla 3 muestra el resultado de aplicar los filtros. Las columnas indican la cantidad de datos que han pasado cada criterio de filtrado, contando con un 91.23 %, 90.36 % y 90.61 % de los datos que pasan el QC para AP, CE y YU respectivamente.

En la Figura 1 se muestran los gráficos de dispersión de la GHI vs coseno del ángulo cenital (CTZ) de los datos en los cuales se aplicaron los modelos. Puede observarse que aunque el proceso de QC es minucioso no se muestran valores atípicos sobre la medida.

Luego se realizó la integración horaria de los datos, obteniéndose un total de 3494, 3067 y 2291 valores horarios para AP, CE y YU respectivamente. Las medias las medidas horarias de GHI son de $501.7 W/m^2$, $319.3 W/m^2$, y $295.2 W/m^2$ para AP, CE y YU respectivamente, indicando la gran variabilidad del recurso solar que existe entre los sitios.

Información satelital

GOES-16 es un satélite meteorológico de la serie GOES operado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. Su objetivo principal es proporcionar observaciones meteorológicas y climáticas de la Tierra desde una órbita geostacionaria, lo que significa que se mantiene en una posición fija sobre una región específica de la Tierra, lo que le permite monitorear continuamente su área de cobertura, abarcando los territorios de América del Norte y del Sur y el Océano Atlántico hasta la costa oeste de África (Losos, 2021).

El producto Cloud and Moisture Imagery (CMI) del satélite GOES-16 consiste en el conjunto de imágenes de nubosidad y humedad capturadas por el instrumento ABI (Advanced Baseline Imager) a bordo del satélite. Estas imágenes proporcionan información sobre la distribución y la intensidad de las nubes y la humedad en la atmósfera. El producto CMI se utiliza para monitorear y analizar las condiciones meteorológicas, especialmente en relación con la formación de tormentas y sistemas climáticos. Estas imágenes son útiles para los meteorólogos y otros profesionales que estudian el clima y el tiempo. El CMI utiliza los datos de la vista de la Tierra del nivel 1b del ABI y los expresa en términos de factor de reflectancia para los canales VNIR (Bandas 1-6) y temperatura de brillo para los canales IR (Bandas 7-16) (W. y Schmit, 2018).

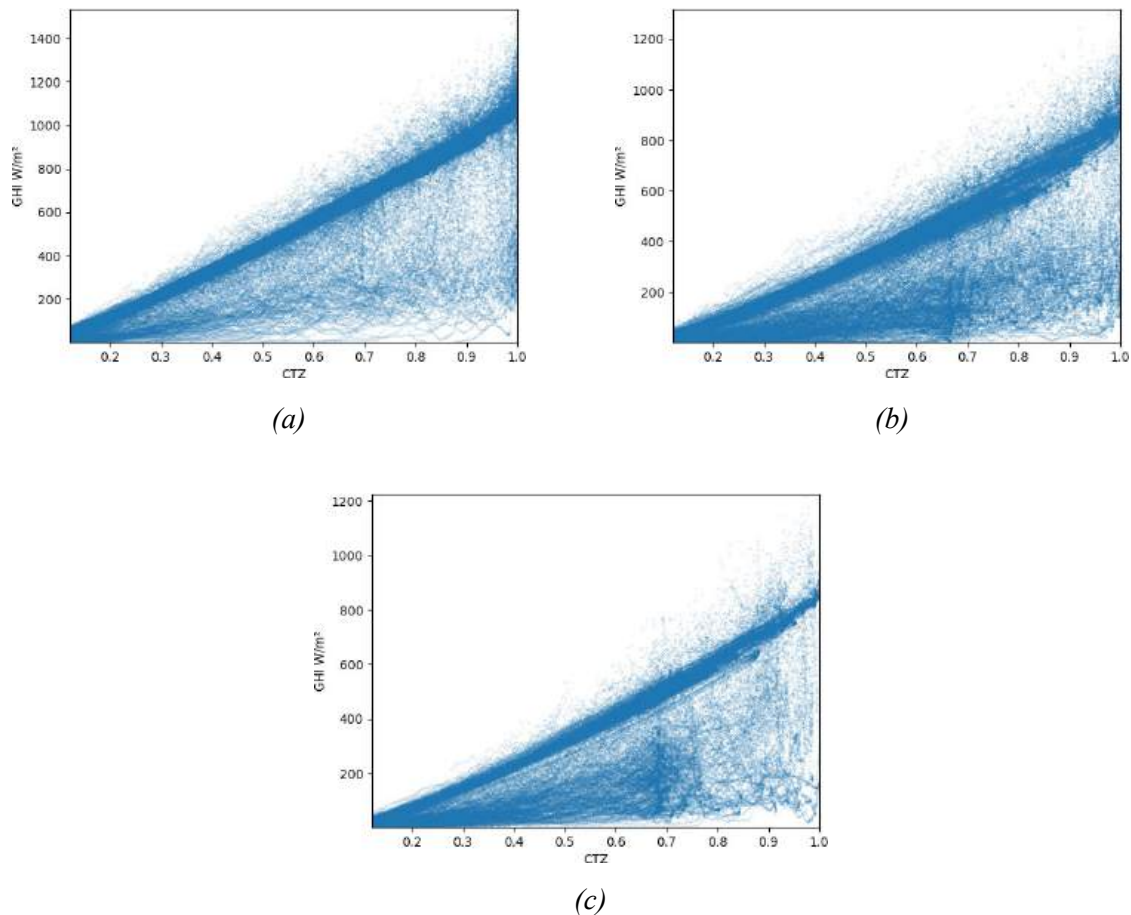


Figura 1: Gráfico de dispersión de las medidas disponibles de GHI en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

MODELOS SATELITALES

Básicamente, la idea detrás de un modelo satelital para estimar la cantidad de energía solar que llega a la superficie de la Tierra consiste en convertir una imagen del canal visible en una imagen de la irradiancia solar a nivel del suelo. Esto se logra mediante la conversión de la lectura del canal visible en una indicación de la nubosidad, que a su vez se utiliza para aplicar un modelo y obtener una estimación del valor de la irradiancia. La indicación de nubosidad puede ser desde algo muy sencillo, como el propio factor de reflectancia, hasta definiciones más elaboradas, como los índices de nubosidad (Alonso-Suárez, 2017).

Factor de reflectancia y reflectancia planetaria

El factor de reflectancia es una medida de la cantidad de luz visible reflejada por un objeto en comparación con la luz recibida. En la teledetección, se utiliza para crear firmas espectrales y detectar diferentes clases de vegetación y superficies terrestres. El factor de reflectancia contiene en esencia la misma información física que la radiancia observada por el satélite, pero normalizada y corregida por la variación de la distancia Tierra-Sol (Laguarda, 2021). Esta variable es sensible a la presencia de nubosidad (en la medida que el alto brillo de las nubes se distinga del fondo), pero depende además de la posición relativa del Sol respecto a la Tierra y de la posición relativa entre el satélite y el Sol, dado que el sistema Tierra-Atmósfera no refleja de forma perfectamente isotrópica. Para disminuir la dependencia con la posición aparente del Sol se define la reflectancia planetaria o albedo terrestre ρ , siendo su valor un indicador de la reflectividad del sistema Tierra-Atmósfera, principalmente afectada por la nubosidad (Alonso-Suárez, 2017).

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de una imagen de reflectancia planetaria. Esta imagen brinda una

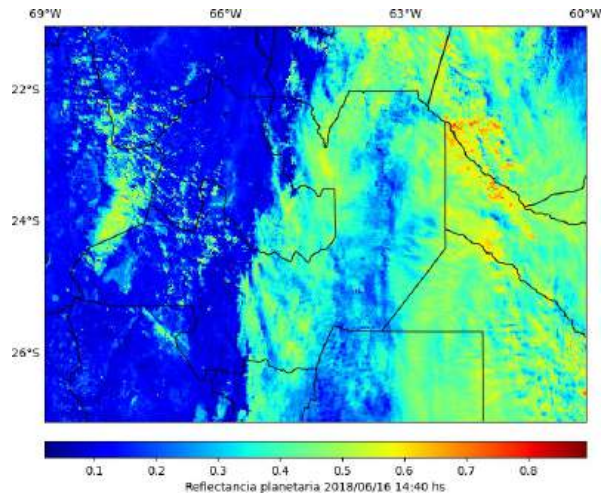


Figura 2: Reflectancia Planetaria

indicación de la reflectividad de los elementos en la imagen, Los valores cercanos a 0, color azul, indican que la superficie absorbe toda la radiación y no refleja nada, mientras que los valores cercanos a 1, en color rojo, indican que la superficie refleja toda la radiación incidente.

El modelo de Cano et al.

El modelo propuesto por Cano es un modelo estadístico que permite calcular la irradiancia solar a nivel de suelo a partir de imágenes satelitales. Este modelo se basa en el cálculo del índice de nubosidad η , que se obtiene a partir de la reflectancia planetaria o albedo terrestre (ρ) (Cano et al., 1986).

Este modelo utiliza un conjunto de datos de entrenamiento de datos terrestres para determinar los parámetros del modelo de regresión, que a su vez predicen la radiación global. La idea básica de este método es que la cantidad de cobertura de nubes en una determinada área determina estadísticamente la radiación global para esa área. El procesamiento se divide en dos pasos: primero se deriva un índice de cobertura de nubes o índice de nubosidad para cada ubicación de la imagen satelital original y luego se utiliza en una segunda etapa para una estimación estadística de la radiación global.

En cuanto a los resultados obtenidos, el modelo se probó en dos conjuntos de datos diferentes, uno que cubre Francia en mayo de 1979 y otro que en Europa en abril de 1982. En ambos casos, se compararon los valores estimados y medidos y se calcularon los errores. En el primer conjunto de datos, el coeficiente de correlación entre los valores medidos y estimados fue en la mayoría de los casos mejor que 0.8, y el error cuadrático medio (RMS) osciló entre 14 y 72 J/m² (9 a 200 Wh/m²) con un valor promedio de 42 J/m² (117 Wh/m²). En el segundo conjunto de datos, los resultados fueron aún mejores, con RMS de 18, 24 y 23 J/m² (50, 67, 64 Wh/m²) para los tres períodos de una hora. En general, los resultados sugieren que este modelo estadístico puede ser una herramienta útil para estimar la radiación solar global en áreas donde no se dispone de mediciones directas.

El índice de nubosidad se utiliza para estimar la cantidad de nubes en la imagen satelital, lo cual es importante ya que las nubes reducen la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. A partir de este índice de nubosidad, se aplican distintas correcciones que permiten estimar la irradiancia solar a nivel de suelo con mayor precisión.

El modelo de Cano ha sido muy influyente en la investigación sobre estimación de irradiancia solar a partir de imágenes satelitales y ha inspirado otros modelos posteriores, como los modelos SUNY (Perez et al., 2002a) y Heliosat (Rigollier et al., 2004), que han mejorado aún más la precisión de las estimaciones.

La manera en la que en este modelo se define el índice de nubosidad η es la siguiente:

$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_c - \rho_o} \quad (1)$$

donde:

ρ = reflectancia planetaria de nivel de píxel.

ρ_o = factor de reflectancia de fondo.

ρ_c = parámetro asociado a la atenuación máxima por nubosidad.

En condiciones de cielo despejado, el valor de η se aproxima a cero, por el contrario, cuando el cielo está completamente cubierto, η se acerca a la unidad.

Para obtener los valores de ρ_o y ρ_c en este modelo, se lleva a cabo un proceso iterativo en la serie temporal de ρ definido por (Moussu et al., 1989), donde se busca encontrar los valores que permitan normalizar la serie de datos de ρ de la mejor manera.

Para obtener el valor de ρ_o se eliminan las muestras con albedo superior al promedio del conjunto (j) de manera iterativa, hasta que no quede ninguna muestra descartada, añadiendo un pequeño umbral E . El valor de ρ_o corresponderá con el promedio del último conjunto obtenido. Para obtener el valor de ρ_c se sigue un procedimiento opuesto al descrito, eliminando de manera iterativa las muestras con albedo inferior al promedio más una tolerancia.

En base a esta definición del índice de nubosidad se propone la definición de la GHI instantánea como,

$$GHI_{Cano} = G_{TOA} \times f(\eta) \quad (2)$$

donde:

G_{TOA} = la irradiancia global extraterrestre en el tope de la atmósfera.

$f(\eta)$ = una relación lineal simple de la forma $f(\eta) = a\eta + b$. Los valores de a y b deben ser ajustados para cada sitio utilizando medidas de tierra.

El modelo SUNY

En este modelo η calculado a partir de la reflectancia planetaria (albedo), y se basa en la correlación entre la relación de la irradiancia global en la superficie y la irradiación extraterrestre sobre la atmósfera. SUNY se refiere a "State University of New York", donde se desarrolló originalmente este modelo (Perez et al., 2002a)

En este modelo la definición de η sigue la siguiente forma,

$$\eta_{SUNY} = \frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (3)$$

Para calcular el índice de nubosidad, se utiliza una técnica que implica el uso de una ventana móvil durante varios días. Esto permite llevar un registro del rango dinámico de la serie temporal de albedos y establecer valores para ρ_{max} y ρ_{min} .

$$GHI_{SUNY} = G_{csk} \times f(\eta_{SUNY}) \quad (4)$$

donde:

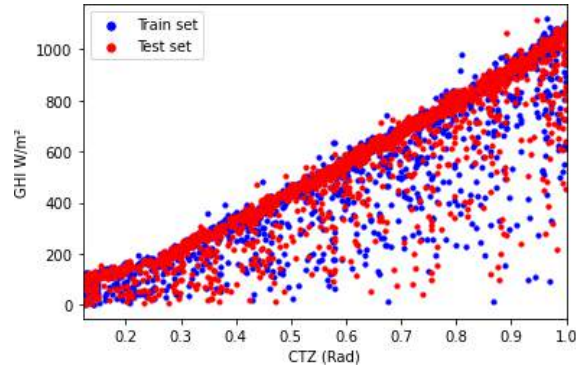
G_{csk} = irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro.

$f(\eta_{SUNY}) = a\eta_{SUNY} + b$. Los valores de a y b deben ser ajustados para cada sitio utilizando medidas de tierra.

DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN

División del conjunto de datos

Para realizar la evaluación del rendimiento de los modelos en base al ajuste de los parámetros a y b , los datos se dividen en los conjuntos de entrenamiento (train) y prueba (test), con los que se realiza una validación cruzada.



(a)

Figura 3: Gráfico de dispersión de GHI medida vs CTZ de los conjuntos Train y Test en AP

La Figura 3 muestra la división de los conjuntos de los datos en AP. El coeficiente de correlación entre el conjunto train y test es de -0.016, -0.021 y 0.008 para AP, CE y YU respectivamente.

Las métricas utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos frente a las medidas son:

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i}{n} \quad (5)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (6)$$

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

donde:

x = Valor medido

y = Valor estimado

n = Tamaño de la muestra

\bar{x} = Media de los valores medidos

\bar{y} = Media de los valores estimados

e = es la diferencia entre x e y

\bar{e} = Media de e

Los indicadores MBE, MAE, RMSD y S también son presentados en términos relativos como porcentaje de la media de la serie medida, denominados aquí MBE %, MAE %, RMSD % y S % respectivamente.

Modelo satelital Heliosat-4

Heliosat-4 (Qu et al., 2017) es un modelo satelital que estima GHI y DNI para toda condición de cielo obteniendo información de las nubes a través de imágenes Meteosat. Este modelo se toma como referencia en la comparativa puesto que ha sido utilizado en distintas evaluaciones realizadas en la región, aunque no ha sido caracterizado puntualmente en los sitios de estudio de este trabajo (Salazar y Gueymard, 2019; Miranda, 2023).

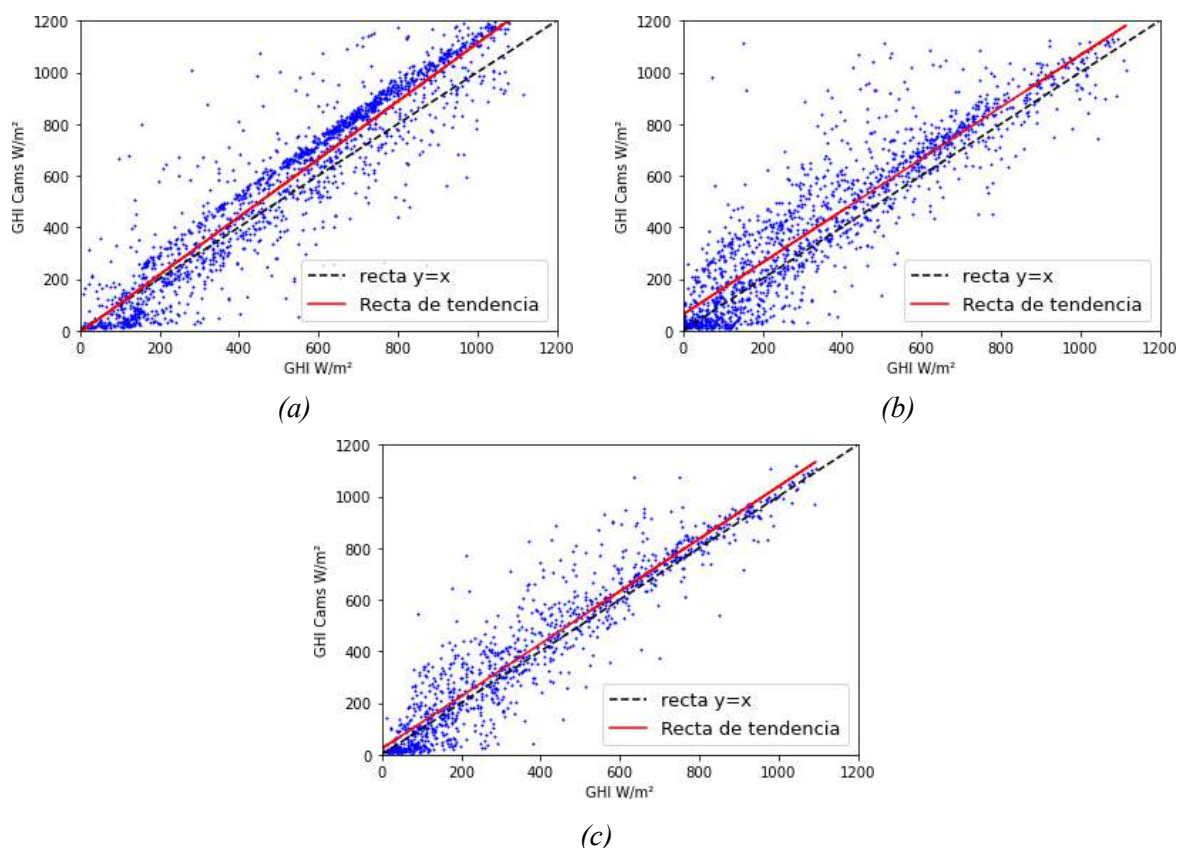


Figura 4: Gráfico de dispersión de GHI medida vs GHI estimada por Heliosat-4 en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

La Figura 4 muestra una comparativa entre los valores horarios medidos y los valores estimados por el modelo Heliosat-4 del conjunto test. En términos cualitativos la estimación presenta grandes limitaciones, existe un sesgo sistemático en donde las estimaciones tienden a ser más altas que los valores medidos, esto aun en condiciones de nubosidad baja como en AP.

Tabla 4: Métricas de desempeño del modelo Heliosat-4

Estación	MBE W/m ²	MAE W/m ²	RMSD W/m ²	S W/m ²
AP	76.07	119.04	159.35	140.02
CE	63.57	103.82	144.58	129.85
YU	13.33	40.02	77.12	75.96

En la Tabla 4 se muestran los valores de las métricas de desempeño en términos absolutos. Claramente el modelo Heliosat-4 sobrestima la medida. En YU la estimación tienen a ser favorable con MBE de $\sim 77\text{W/m}^2$, mientras que en AP y YU la sobrestimación indica un MBE $\sim 58.8\text{W/m}^2$.

Implementación del modelo CANO et al.

En esta implementación la serie temporal η fue obtenida a partir de la Ecuación 1, es decir que se calcularon los valores de ρ_o y ρ_c para cada sitio. En la Tabla 5 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 5: Valores ρ_o y ρ_c obtenidos

Estación	ρ_o	ρ_c
AP	12.90	86.99
CE	11.77	93.53
YU	9.55	87.03

Una vez obtenida la serie η para este modelo, los parámetros a y b se ajustaron aplicando una regresión lineal.

Tabla 6: Coeficientes a y b obtenidos para el modelo Cano et al.

Estación	a	b
AP	-0.659	0.751
CE	-0.701	0.658
YU	-0.639	0.690

La Tabla 6 muestra los valores a y b obtenidos para las tres estaciones. Estos coeficientes fueron obtenidos a partir de una regresión lineal aplicada sobre el conjunto train.

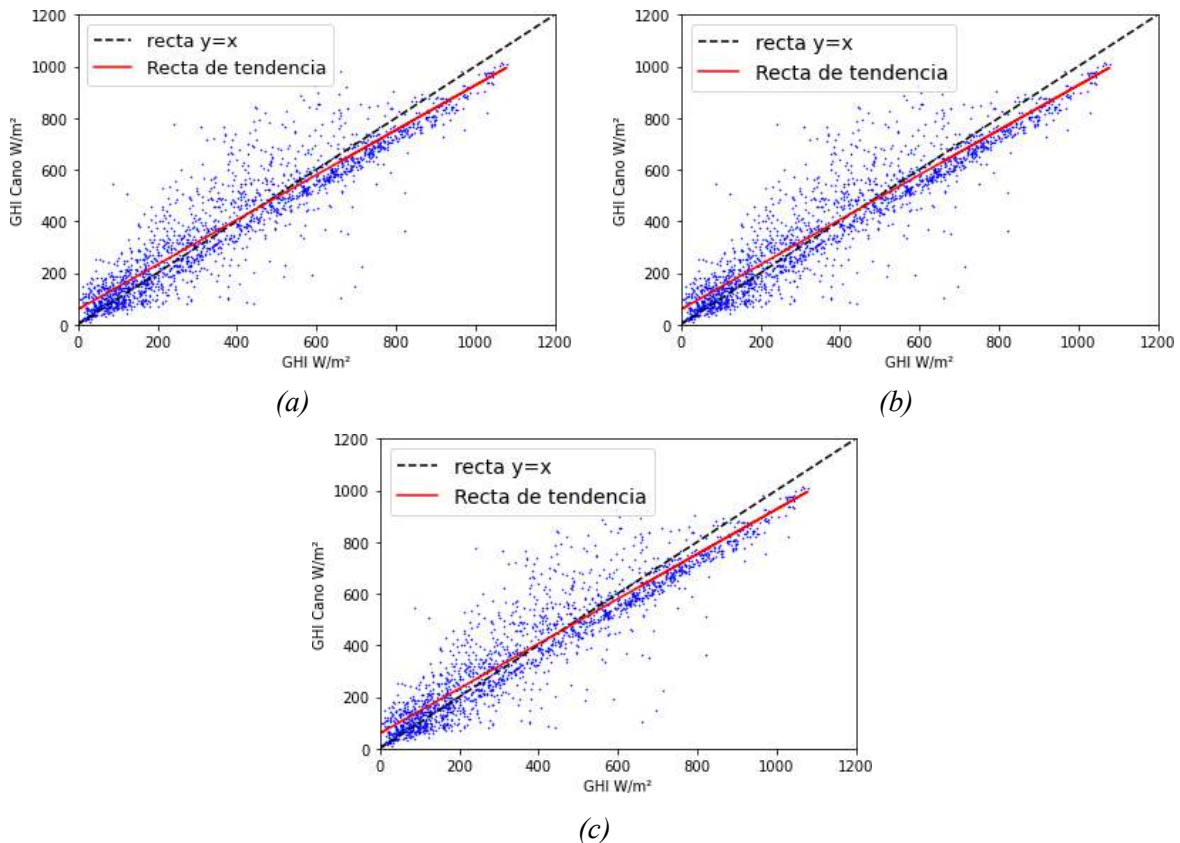


Figura 5: Gráfico de dispersión de la GHI medida vs GHI estimada por el modelo CANO et al. en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

En la Figura 5 se muestran los gráficos de dispersión de los valores estimados por el modelo en función de la medida para el conjunto test. Gráficamente puede apreciarse cómo disminuye la dispersión si se compara los datos obtenidos los del modelo Heliosat-4.

Implementación del modelo SUNY

La implementación del modelo SUNY requiere la elección de un modelo de estimación de GHI en condiciones de cielo claro (GHI_{csk}), en este trabajo se utilizó el modelo $ARGP_{v2}$, que es un modelo estadístico basado en los estimativos del modelo Mc-Clear, y que fue desarrollado y evaluado para la región de estudio de este trabajo. $ARGP_{v2}$ presenta un RMSD $\sim 1,857\%$ en escala 15 min, en la región (Ledesma et al., 2022).

Para obtener la serie η sobre la que opera el modelo SUNY deben encontrarse los valores de ρ_{min} y ρ_{max} , para encontrar ρ_{min} y ρ_{max} se utilizó un proceso similar al desarrollado en (Laguarda et al., 2018). ρ_{min} fue calculado como el promedio de los 20 valores más bajos tomando una ventana móvil de 160 hs. centrada en en la hora de interés. En la Figura 6 puede observarse el comportamiento estacional que presenta ρ_{min} . ρ_{max} está asociado a gran presencia de nubosidad, por lo que se tomó constante, igual al 80 % de la reflectancia máxima, se tomó este valor a partir del resultado obtenido por el análisis de sensibilidad realizado en (Laguarda et al., 2018). En la Figura 6 se presentan los valores ρ_o , ρ_c , ρ_{min} y ρ_{max} obtenidos. Puede observarse cómo claramente el sitio AP presenta una mayor cantidad de valores ρ próximos al mínimo, indicando baja nubosidad, lo que coincide con las características climáticas del sitio, contrario a CE y YU que presentan mayor dispersión.

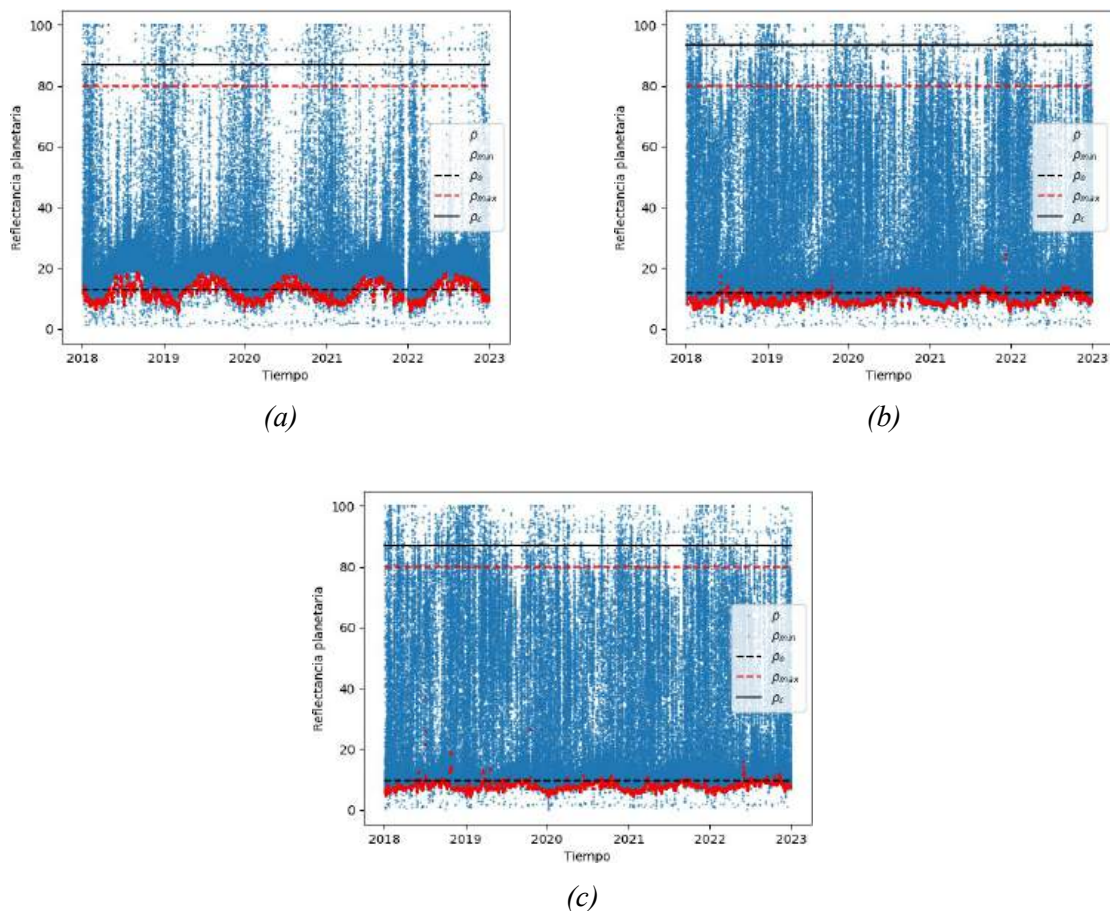


Figura 6: Gráfico de Reflectancia Planetaria en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

Una vez obtenida la serie temporal η mediante una regresión lineal se obtuvieron los coeficientes a y b

obtenidos que optimizan el modelo sobre el conjunto train, presentados en la tabla 7.

En la Figura 7 se muestran los gráficos de dispersión de los valores estimados por el modelo en función de la medida para el conjunto test. En términos generales se observa un mejor desempeño del modelo respecto a la estimación de Heliosat-4. Los valores estimados obtenidos presentaron un comportamiento similar al obtenido por el modelo Cano et al.

Tabla 7: Coeficientes a y b obtenidos para el modelo SUNY.

Estación	a	b
AP	-0.649	0.891
CE	-0.801	0.912
YU	-0.871	0.987

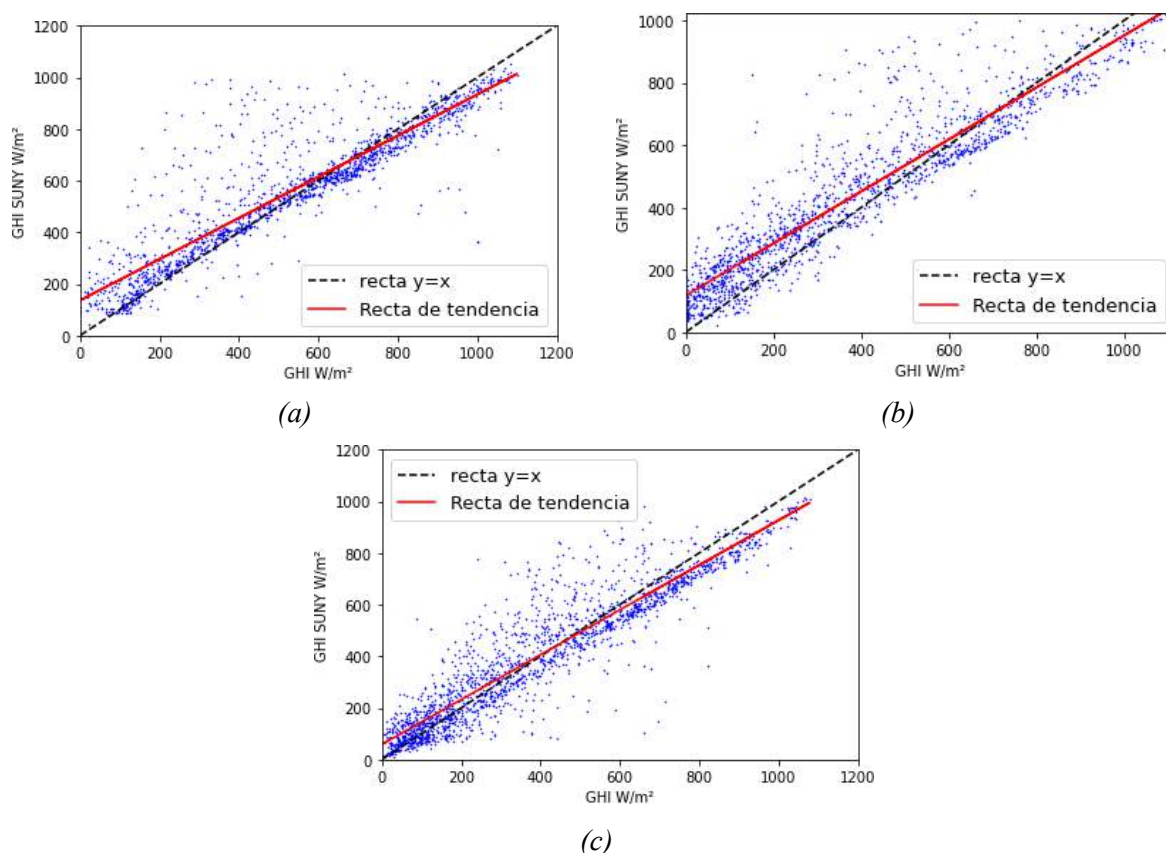


Figura 7: Gráfico de dispersión de la GHI medida vs GHI estimada por el modelo SUNY en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

Evaluación del desempeño

Tabla 8: Métricas de desempeño en términos absolutos

Estación	Modelo	MBE W/m^2	MAE W/m^2	RMSD W/m^2	S W/m^2
AP	Cano	32.00	84.47	126.19	122.01
AP	SUNY	46.84	75.79	130.43	121.73
CE	Cano	22.35	89.63	115.40	113.21
CE	SUNY	54.44	86.85	117.04	103.60

YU	Cano	18.29	71.34	92.86	91.04
YU	SUNY	11.08	28.01	35.42	33.64

En la Figura 8 se muestra el comportamiento del RMSD % en función de los índices de nubosidad tanto para modelo SUNY en AP (8a) como para el modelo Cano et al en YU (8b), además se muestra el desempeño del modelo Heliosat-4. Las gráficas dejan en evidencia que al incrementarse la nubosidad el error de ambos modelos tiende a incrementarse gradualmente.

Tabla 9: Métricas de desempeño en valores relativos a la media de las medidas

Estación	Modelo	MBE %	MAE %	RMSD %	S %
AP	Cano	6.24	16.48	24.62	23.81
AP	SUNY	9.13	14.78	25.44	23.75
CE	Cano	5.85	23.74	30.22	29.64
CE	SUNY	14.25	22.74	30.65	27.13
YU	Cano	4.72	18.44	24.01	23.54
YU	SUNY	1.99	18.33	26.22	26.14

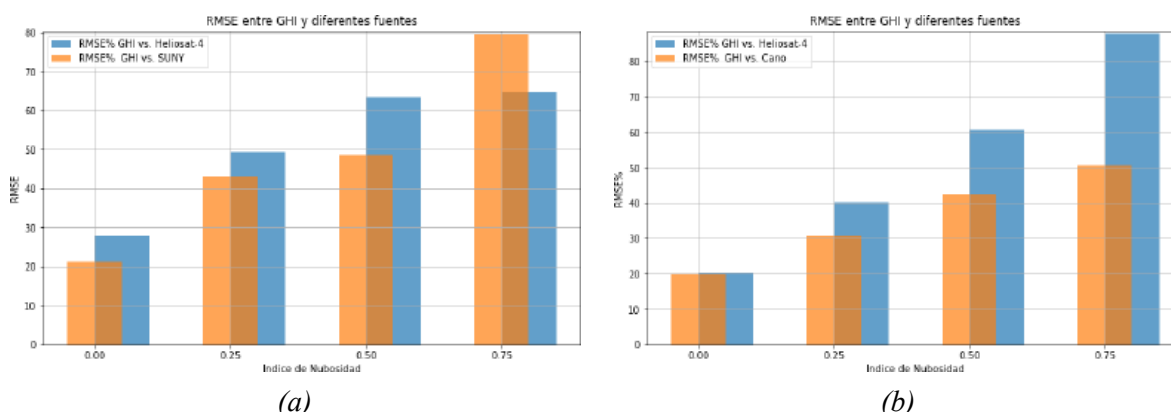


Figura 8: Histograma del RMSD en función de η en las estaciones AP (a), YU (b) para los modelos SUNY y Cano et al respectivamente.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Este trabajo muestra los pasos iniciales en la búsqueda de un modelo satelital operativo para la región NOA. Debe notarse que el modelo satelital CAMS se usa como referencia por ser un modelo donde sus estimaciones son de fácil acceso. Además, este modelo ha sido ya analizado para los sitios de Salta Ciudad (1200 metros snm) y de El Rosal (3350 metros snm), ambos en la provincia de Salta. Debe destacarse que los tres sitios tienen climas diferentes, lo que influye en sus valores de radiación y de temperatura ambiente. Las diferencias en las métricas que muestran los valores medidos con las estimaciones de CAMS sirven para establecer una referencia general. Esto es porque CAMS utiliza estimaciones basadas en imágenes del satélite Meteosat, que solo llegan hasta la longitud -66° (66° Oeste), por lo que las estimaciones pueden ser afectadas por efectos de borde (Miranda, 2023).

Es necesario destacar que la estimación de CAMS es una estimación general, que puede ser mejorada mediante un proceso de site-adaptation, comparativa que no fue abordada en este trabajo, esto debe tenerse en cuenta puesto que los modelos presentados son modelos con ajuste local. En (Miranda, 2023) se analizaron técnicas de aprendizaje automático para constituir un proceso de ajuste local a los estimativos de CAMS, donde se consideraron dos estaciones ubicadas en la provincia de Salta, como resultado se

obtuvo un RMSE $\sim 21\%$ y un coeficiente de correlación ~ 0.93 .

No se encontraron diferencias significativas asociadas al cálculo de η . Pueden explorarse otras alternativas mediante un estudio de sensibilidad para determinar las mejores definiciones para el modelado de ρ_{max} y ρ_{min} .

El ajuste de los coeficientes a y b en ambos modelos requiere la disponibilidad de mediciones terrestres, sin embargo, una caracterización del clima de la región puede permitir utilizar coeficientes encontrados en otras regiones que presenten características similares.

CONCLUSIONES

Los modelos Cano et al. y SUNY presentan en la región MBE ~ 24.21 W/m², MAE ~ 81.81 W/m², RMSD ~ 111.48 W/m², S ~ 108.75 W/m² y MBE ~ 37.45 W/m², MAE ~ 63.55 W/m², RMSD ~ 94.29 W/m², S ~ 86.32 W/m² respectivamente, mientras que el modelo Heliosat-4 presenta MBE ~ 50.99 W/m², MAE ~ 87.62 W/m², RMSD ~ 127.01 W/m², S ~ 115.27 W/m², esto indica una clara ganancia de los modelos locales, lo que es esperable.

La utilización de las imágenes satelitales GOES para la estimación de la GHI promete ser una gran alternativa, aun dadas las características topográficas y climáticas en la zona de estudio, a través de este estudio evaluando los modelos Cano et al. y SUNY, se han identificado los valores que podrían ser considerados como una base a mejorar en cualquier otra implementación en la misma región. Es importante resaltar que tanto CANO como SUNY son modelos simples dentro del ámbito del modelado de irradiancia solar estimada por satélites.

AGRADECIMIENTOS

Se mantiene anónimo para la revisión doble ciego.

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R. (2017). *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. Tesis de doctorado. Universidad de la República (Uruguay)*. Tesis doctoral, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.
- Ayompe, L. y Duffy, A. (2014). An assessment of the energy generation potential of photovoltaic systems in cameroon using satellite-derived solar radiation datasets. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7:257–264.
- Cano, D., Monget, J., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., y Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37(1):31–39.
- Cao, M., Chen, M., Liu, J., y Liu, Y. (2022). Assessing the performance of satellite soil moisture on agricultural drought monitoring in the north china plain. *Agricultural Water Management*, 263:107450.
- Drews, A., Beyer, H., y Rindelhardt, U. (2008). Quality of performance assessment of pv plants based on irradiation maps. *Solar Energy*, 82(11):1067–1075.
- Huld, T., Müller, R., y Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating pv performance in europe and africa. *Solar Energy*, 86(6):1803–1815.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Laguarda, A. (2021). *Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre. Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre. Tesis de doctorado. Universidad de la República (Uruguay)*. Tesis doctoral, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.
- Laguarda, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2018). Modelo semi-empírico simple de irradiación solar global a partir de imágenes satelitales goes.

- Ledesma, R. D., Salazar, G. A., y de Castro Vilela, O. (2022). Arpv2 un modelo práctico para la estimación de ghi en sitios de altura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26:283–289.
- Losos, D. (2021). Beginner's guide to goes-r series data. how to acquire, analyze, and visualize goes-r series data.
- Miranda, D. R. D. (2023). Procedimiento de classificação e regressão aplicado ao site adaptation da radiação solar. *UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES*.
- Moltoni, A., Clemares, N., Gorandi, E., y Moltoni, L. (2016). Enarsol. red de medición de radiación solar interconectada. *III Congreso Argentino de Ingeniería y IX Congreso Argentino de la Enseñanza en Ingeniería, Resistencia, Argentina*.
- Moussu, G., Diabate, L., Obrecht, D., y Wald, L. (1989). A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 10(7):1207–1225.
- Nollas, F. M., Salazar, G. A., y Gueymard, C. A. (2023). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*, 202:40–55.
- Perez, R., Ineiche, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., y Vignola, R. G. F. (2002a). A new operational model for satellite-derived irradiances: Description and validation. *Solar Energy*, 73:307–317.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., y Vignola, F. (2002b). A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, 73(5):307–317.
- Polo, J., Wilbert, S., Ruiz-Arias, J., Meyer, R., Gueymard, C., Sùri, M., Martín, L., Mieslinger, T., Blanc, P., Grant, I., Boland, J., Ineichen, P., Remund, J., Escobar, R., Troccoli, A., Sengupta, M., Nielsen, K., Renne, D., Geuder, N., y Cebeauer, T. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. *Solar Energy*, 132:25–37.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., y Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The heliosat?4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57.
- Rigollier, C., Lefèvre, M., y Wald, L. (2004). The method heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2):159–169.
- Salazar, G., Alonso-Suárez, R., Cirigliano, A. L., y Ledesma, R. (2021). Evaluación del proceso de adaptación al sitio aplicado a la irradiancia solar global medida en la ciudad de salta, argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 25.
- Salazar, G. y Gueymard, C. (2019). Comparación de valores de irradiancia global medida en sitios de altura en argentina contra bases de datos satelitales.
- Salazar, G., Gueymard, C., Galdino, J. B., de Castro Vilela, O., y Fraidenraich, N. (2020). Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117:109478.
- Salazar, G. A., Fraidenraich, N., de Oliveira, C. A. A., de Castro Vilela, O., Hongn, M., y Gordon, J. M. (2017). Analytic modeling of parabolic trough solar thermal power plants. *Energy*, 138:1148–1156.
- Sengupta, M., Habte, A., Wilbert, S., Gueymard, C., y Remund, J. (2021). Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications: Third edition. Technical report, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- Vignola, F., Grover, C., Lemon, N., y McMahan, A. (2012). Building a bankable solar radiation dataset. *Solar Energy*.
- Volante, J., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M., Viglizzo, E., y Paruelo, J. (2012). Ecosystem functional changes associated with land clearing in nw argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154:12–22. Ecosystem Services and Land-Use Policy.

W., X. y Schmit, T. (2018). Goes-16 abi level 1b and cloud and moisture imagery (cmi) release full validation data quality product performance guide for data users. Dirección URL: <https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2021-08/GOES-16_ABI-L1b-CMI_Full-Validation_ProductPerformanceGuide_v2.pdf> [consulta: 12 de agosto de 2023].

ADVANCES IN THE ESTIMATION OF SOLAR IRRADIANCE IN THE PROVINCES OF SALTA AND JUJUY USING GOES-16 SATELLITE IMAGES

ABSTRACT: The estimation of solar irradiance through satellite images is an efficient way to measure solar radiation across large geographic areas. Satellites have the capacity to regularly capture data at predetermined intervals over extended periods, thereby establishing a comprehensive temporal and spatial information foundation for climate monitoring purposes. This study presents initial findings pertaining to the estimation of solar irradiance in the provinces of Salta and Jujuy, employing imagery from the GOES-16 satellite. Two straightforward models, based on a cloudiness index, are assessed for their efficacy in estimating solar irradiation at three specific locations within the provinces of Salta and Jujuy, utilizing imagery from the GOES-16 satellite.

Keywords: solar energy, GOES 16, SUNY, cano

MODELADO DE LA TRANSMITANCIA GLOBAL FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA DE MATERIALES UTILIZADOS EN INVERNADEROS EN URUGUAY

J. L. Di-Laccio^{1,2}, C. Barros³, A. Monetta¹, G. Vitale¹, R. Alonso-Suárez¹, G. Abal¹

¹Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del CeNUR Litoral Norte, Universidad de la República

²Centro Regional de Profesores del Litoral (CeRP), Consejo de Formación en Educación

³Estación Exp. de la Facultad de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad de la República

E-mail: jdilaccio@unorte.edu.uy

RESUMEN: En este trabajo se estudia la transmitancia global para la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) de diferentes coberturas (films) utilizadas en invernaderos. Se incluyen cuatro coberturas en su estado de fábrica y cuatro coberturas ya utilizadas, correspondiente al recambio cada tres años (techos norte y sur de cada invernadero). Dos de las coberturas en estado nuevo son de la misma marca y modelo que las de recambio. Se adapta para la transmitancia global PAR de estos films un modelo empírico de uso extendido para la transmitancia global de banda ancha en otras superficies. Este modelo usa como variable de entrada el ángulo de incidencia (θ) de la radiación directa sobre la superficie y tiene dos parámetros ajustables (τ_{np} y p). Se incluye además, a modo de referencia, la utilización de una transmitancia constante. Se observa que el modelo adaptado presenta un mejor desempeño que el modelo constante para toda condición de cielo y cielo despejado, reproduciendo con muy baja incertidumbre la transmitancia global PAR de cielo claro. La degradación de la transmitancia de las coberturas utilizadas por tres años en invernaderos reales se evalúa en 9-12 %, con una diferencia de 2 % entre su utilización con orientación norte o sur.

Palabras clave: transmitancia PAR, coberturas de invernaderos, degradación de coberturas, modelos de transmitancia PAR.

INTRODUCCIÓN

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) comprende la porción del espectro solar de banda ancha que está entre 400 y 700 nm. Esta región espectral es la principal fuente de energía para el proceso de fotosíntesis de las plantas y, por tanto, la PAR interceptada por el cultivo durante su ciclo es un factor determinante del rendimiento del mismo. Los cultivos a cielo abierto reciben un flujo de fotones PAR mayor al de cultivos protegidos bajo coberturas plásticas.

Los invernaderos en Uruguay son en su mayoría estructuras de madera, con techo a dos aguas, cubiertas con una película de plástico (films), y el cultivo es en suelo. La propia estructura del invernadero (cantidad y espesor de madera), la cobertura, y posterior acumulación de polvo y otras suciedades en ella, la condensación en ciertos períodos del ciclo, el sombreado por mallas de sombreado y/o aplicación de cal a fines de primavera-verano, entre otros factores, son causantes de reducción de la PAR incidente sobre el cultivo. El conocimiento de la transmitancia PAR de determinada cobertura y la estimación de la afectación que esta tiene en el tiempo y para una región geográfica dada, es una herramienta útil para el diseño, construcción, y manejo de estas infraestructuras de producción. En particular, permite tener elementos de decisión para la selección de mejores films de acuerdo a los objetivos de producción, ciclos, y necesidades del cultivo específico.

Conocer la PAR disponible en el interior de un invernadero es información de interés para agrónomos y productores, debido a la gran influencia de esta magnitud en el rendimiento del cultivo. No es común que los productores monitoreen y/o registren la PAR al interior de los invernaderos, por lo que muchas de las decisiones que toman sobre sus cultivos se basan en la experiencia previa, repitiendo acciones frente a hechos semejantes. Si bien la experiencia es valiosa para mejorar el manejo de los cultivos, la incertidumbre y variabilidad en rendimiento que conlleva es un asunto de preocupación. Para los productores de menores recursos económicos (pequeños productores familiares), la sostenibilidad de sus sistemas pasa indudablemente por aumentar sus ingresos a través de aumentos en los rendimientos y en la eficiencia con que utilizan los escasos recursos que disponen. Se entiende entonces que son varios los motivos de interés para contar con modelos que permitan estimar la PAR transmitida por las coberturas, reduciendo de esta forma riesgos e incertidumbres.

Existen varios estudios de transmitancia en invernaderos en la literatura. En Giacomelli et al. (1988) se investigó la transmitancia global PAR y de banda ancha (GHI) en un invernadero de tipo arco con doble cubierta de polietileno trabajando a nivel de promedios horarios. Reportan transmitancias similares para PAR y para banda ancha y dan un modelo que las vincula. En Iglesias y Muñoz (2007) se compara la transmitancia de la radiación PAR en distintos tipos de invernaderos con techos curvos y planos (capilla y semi parabólico), cubiertos con el mismo tipo de film semitransparente. Se concentran en la incidencia de la inclinación del techo en la transmitancia PAR sobre un plano horizontal realizando medidas puntuales al mediodía solar. No encuentran diferencias significativas de transmitancia por la forma del techo y determinan una reducción de 17 % en transmitancia al usar doble cobertura. En Kittas et al. (1999); Kittas y Baille (1998) se mide la transmitancia espectral a mediodía solar en el rango de 400 a 1100 nm para diversos films empleadas en invernaderos. En Aldaftari et al. (2019) se estudia espectralmente el uso de coberturas con películas difusoras y atenuadoras (tintadas) con el objetivo de bajar la temperatura en el interior, manteniendo los niveles de fotosíntesis.

En este trabajo se realiza el modelado de la transmitancia global PAR para varios films usados como cobertura semitransparente, en particular analizando su variación con el ángulo de incidencia de la irradiación solar sobre la superficie. La transmitancia solar hemisférica o global (τ_{gl}) de un material es el cociente entre la irradiancia solar global transmitida e incidente. Esta magnitud depende de las propiedades ópticas del material, de la longitud de onda, y del ángulo de incidencia de la irradiancia solar. Al ser considerada en una porción del espectro con un determinado ancho espectral, la dependencia con la longitud de onda se elimina, representando por tanto el comportamiento promedio dentro la porción considerada. La transmitancia PAR de una cobertura puede ser considerada como cociente de irradiancia o del flujo fotónico. Estos cocientes no son exactamente iguales debido a la selectividad espectral de la transmisividad de la cobertura. Debido al uso agropecuario, en este trabajo interesa modelar la transmitancia PAR para flujo fotónico, es decir,

$$\tau_p = \frac{Q_{pt}}{Q_{pi}}, \quad (1)$$

donde Q_p expresa el flujo de fotones PAR en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, y t e i denotan a los flujos transmitido e incidente, respectivamente. Esta cantidad se mide empleando sensores cuánticos de uso extendido para la medida de radiación solar con fines agropecuarios. Más información sobre la conversión de la PAR de irradiancia a flujo fotónico (de unidades radiométricas a unidades cuánticas) pueden consultarse en Akitsu et al. (2015) y Di-Laccio et al. (2023).

En el presente utiliza el Sol, en toda condición de nubosidad, como fuente de luz sobre la cobertura sin cultivo, montada sobre un marco horizontal sin cultivo. Esto permite dejar de lado los efectos de evapotranspiración de cultivos, rocío matinal, lluvias, suciedad acumulada, entre otros, prevaleciendo el efecto del film. Se ajusta y evalúa el desempeño a escala minutil de un modelo fenomenológico de τ_p para cuatro coberturas de invernaderos nuevas que habitualmente consiguen en plaza los productores del litoral norte de Uruguay. Adicionalmente, se estudia el cambio en la transmitancia por el envejecimiento de dos coberturas de recambio, luego de 3 años de uso en un invernadero. Para esto, se comparan las

transmitancias de una misma marca y modelo, al considerarse en su estado nuevo y de recambio, luego de ser utilizados en techos norte y sur de un invernadero productivo real.

MODELOS

Los modelos físicos o empíricos para la transmitancia solar global de una cubierta transparente, por lo general, requieren la medida de la radiación solar directa (G_b) y difusa en plano horizontal (G_d). Estas medidas son específicas de laboratorios de investigación, puesto que requieren de un seguimiento y mantenimiento regular de los equipos (seguimiento solar de precisión y esfera de sombreado). A nivel de campañas de medición las variables registradas habitualmente son las meteorológicas clásicas y la radiación solar global en plano horizontal (G_h), y en algunos casos se mide también la PAR en plano horizontal (Q_p). En caso de modelar τ_p a partir de modelos dependientes de G_b y G_d , se tendrá la dificultad planteada sobre la disponibilidad de estas medidas en campo. Evitando esta dificultad, en este trabajo se considera un modelo empírico simple que requiere solamente el cálculo del ángulo de incidencia de la radiación solar directa (θ), además de la medida de la Q_p exterior para estimar la Q_p interior a través del τ_p modelado.

El modelo propuesto por Schultz y Svendsen (1998), Ec. (2), está pensado para determinar la transmitancia global de una cubierta vidriada en todo el ancho de banda del espectro solar. Este modelo empírico es a-priori adecuado para describir la transmitancia de cualquier cubierta semitransparente plana. En este trabajo se demuestra que el modelo puede describir bien la tendencia de los datos de transmitancia PAR para varias coberturas de invernaderos.

$$\tau_{p1} = \tau_{np} [1 - \tan^p(\theta/2)] \quad (2)$$

El modelo, que denominaremos SSM, tiene una dependencia angular con respecto al haz de luz directo y dos parámetros ajustables: (i) la transmitancia en incidencia normal τ_{np} , y (ii) el parámetro p asociado al coeficiente de extinción del material.

Por otro lado, se toma como referencia la utilización de un valor constante para modelar esta transmitancia (Ec. (3)), dado que es una opción usual. Esta idea puede utilizarse para cálculos rápidos y aproximados, teniendo mejor resultado en ciertas condiciones cielo y de altura solar (α_s). Se espera que la incertidumbre de este método, denominado aquí CTE, sea mayor.

$$\tau_{p2} = \text{constante} \quad (3)$$

EQUIPOS Y MÉTODO EXPERIMENTAL

Las medidas fueron realizadas en el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Universidad de la República, en su estación experimental de Salto, Uruguay, denominada LE (-31.28°, -57.92°, 56 m snm). Se realizaron medidas en plano horizontal de la PAR transmitida e incidente, Q_{pt} y Q_{pi} de forma simultánea y para una cobertura a la vez. Las mediciones se tomaron en forma continua y a escala minutal durante dos semanas para cada muestra. Se ensayaron ocho coberturas, cuatro nuevas de diferentes marcas y cuatro de recambio (con 3 años de uso) de dos invernaderos del tipo capilla en operación, correspondientes a la misma zona geográfica. Las coberturas de recambio son de techos orientados al norte (N) y al sur (S). En la Tabla 1 se resumen las etiquetas asignadas a cada cobertura y sus principales características relacionadas con la investigación. En particular, se debe destacar que la notación utilizada para cada cobertura está en relación con su espesor, en μm .

Para el registro de las medidas se construyó el dispositivo experimental de la Fig. 1, que consiste en un aro metálico de color gris opaco de 28 cm de diámetro sujetado a la mesa mediante tornillos. En la parte interior del aro se coloca un sensor cuántico y encima se coloca la cobertura seleccionada, la cual es sujeta por precintos de plástico. Fuera del recinto se ubica otro sensor cuántico para la medida exterior. Los dos sensores cuánticos utilizados son del modelo LI-190R, que constan de un difusor (disco

Tabla 1: Etiqueta y características de cada cobertura.

Cobertura	Espesor (μm)	Estado	Caída del techo
TT150	150	Nueva	-
TT120	120	Nueva	-
AC150	150	Nueva	-
AG150	150	Nueva	-
TT150N	150	de recambio	Norte
TT150S	150	de recambio	Sur
AG150N	150	de recambio	Norte
AG150S	150	de recambio	Sur

de acrílico plano), un filtro para la región espectral PAR, y un fotodiodo de Silicio. Ambos medidores tienen calibración de fábrica vigente con una incertidumbre de $\pm 5\%$ (LI-COR, 2023), y previo al inicio de la recolección de medidas fueron intercomparados y ajustados finamente entre sí para minimizar las diferencias en el registro de mediciones absolutas entre ambos. Se incluyen además medidas de irradiancia global en plano horizontal, G_h , para el control de calidad de las muestras y la selección de datos en condiciones de cielo claro. Las medidas se registran a escala minutería, con relojes sincronizados, y cada dato es el promedio de medidas instantáneas tomadas cada 10s dentro del minuto. El registro de G_h es mediante un piranómetro de la marca Kipp & Zonen, modelo CMP10 (Clase A con respuesta espectral plana según la norma ISO 9060:2018) equipado con unidades de ventilación y calefacción CVF4 para evitar la acumulación de polvo y gotas de agua en sus cúpulas. Este cuenta con calibración vigente, y ha sido calibrado contra un piranómetro de referencia Kipp & Zonen CMP22 que tiene trazabilidad a la referencia radiométrica mundial en Davos, Suiza. Estas medidas, conjuntamente con cálculos de geometría solar, permiten la evaluación de los modelos para la transmitancia global PAR en plano horizontal.



Figura 1: Ilustración del dispositivo experimental. Sobre una mesa de medidas se sujeta un aro el cual contiene en su interior un medidor PAR y en la cara superior se sujeta la cobertura. A 2.5 m del aro se ubica el sensor PAR externo.

El control de calidad de los datos se realiza a escala minutil y a partir de las medidas de G_h y Q_p . Primero se realiza una inspección visual donde se excluyen días de precipitaciones debido a la acumulación de agua sobre la cubierta, así como datos notoriamente anómalos. Al conjunto de datos diurnos que pasa la inspección visual, se le aplican filtros automáticos secuenciales.

Los filtros de calidad aplicados son: F1, selecciona muestras con altura solar mayor a 15° (este filtro elimina los datos afectados por las paredes del aro metálico); F2, límites sobre G_h fundamentados en los filtros de la BSRN (Baseline Solar Radiation Network, <https://bsrn.awi.de/>), cuyos coeficientes fueron ajustados localmente (McArthur, 2005)); F3, límites superior e inferior para Q_{pi} , fijados por inspección visual (Foyo-Moreno et al., 2017; Di-Laccio et al., 2021)); F4, límites para la fracción PAR definida como el cociente $f_p = Q_{pi}/G_h$, donde el límite inferior se determina con el cociente de las constantes solares PAR y de banda ancha a nivel tope de la atmósfera (Di-Laccio et al., 2022)), $Q_{sp} = 2413 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y $G_s = 1361 \text{ W}/\text{m}^2$, incluyendo una estimación de su incertidumbre, y el límite superior se determina por inspección visual; F5, es el límite físico para la transmitancia global PAR, considerando un máximo de 7% de error experimental, levemente por encima de la incertidumbre de 5% de las medidas de Q_p que se utilizan para su cálculo.

Tabla 2: Resumen del control de calidad de las medidas.

Filtro	Condición	Datos	% Descarte
Diurnos	$\cos \theta_z > 0$	39659	-
F1	$\cos \theta_z > 0.2588$ (equiv. a $a_s > 15^\circ$)	33585	15.3
F2	$0 < G_h < G_{sc} (0.85) \cos^{(1.15)} \theta_z + 20 \text{ W}/\text{m}^2$	31559	5.1
F3	$a_{min} kt < Q_{pi} < a_{max} kt + c^*$	30618	2.3
F4	$1.7 \text{ J}/\text{mol} < f_p < 10 \text{ J}/\text{mol}$	30297	0.8
F5	$0 < \tau_{pg} < 1.07$	30193	0.3
Total		30193	23.9

* a_{min} , a_{max} y c se fijan por inspección visual.

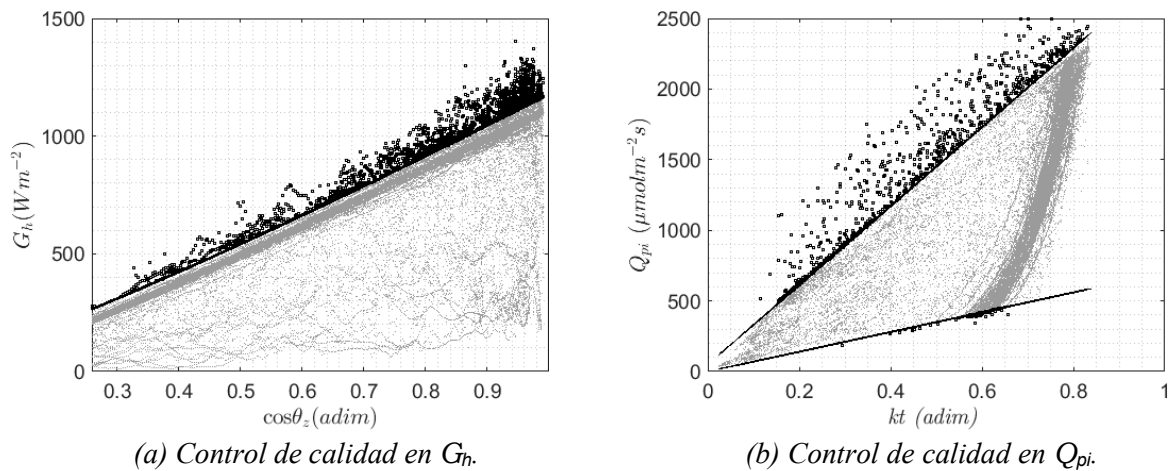


Figura 2: (a) Filtrado de la radiación global incidente (G_h) y su dependencia con el coseno del ángulo cenital (θ_z). (b) Filtrado de la radiación PAR incidente (Q_{pi}) y su dependencia con el índice de claridad (kt). Se identifican con puntos grises los datos que pasan el control de calidad y con cuadrados negros los datos excluidos.

En la Tabla 2 se presenta un resumen que indica la etiqueta del filtro utilizado, la condición exigida, el número de datos que pasan el filtrado, y el porcentaje de descarte del proceso (este porcentaje es calculado respecto a los datos diurnos iniciales). En la Fig. 2a se presenta el filtrado de G_h y de Q_{pi} . En color gris se muestran los datos que pasan los filtros y en negro los descartados. Los datos obtenidos se agrupan por cobertura, es decir, se conforman ocho conjuntos de datos, cuatro de coberturas nuevas y cuatro de recambio (dos de orientación norte y dos del sur). A su vez, dentro de cada conjunto particular, se identifica el subconjunto de muestras correspondientes a cielo claro, utilizando el algoritmo de Reno y Hansen (2016) disponible en la biblioteca de código abierto PVLIB. Este algoritmo se aplica a escala minutal sobre G_h con una ventana móvil de 30 minutos. En la Tabla 3 se especifica la cantidad total de datos disponibles y del subconjunto de datos de cielo claro en cada caso, indicando además el porcentaje de muestras de cielo claro en el periodo en que se ensayó cada cobertura.

Los modelos de las Ecs. (2) y (3) se entrenan y evalúan para cada cobertura considerando las muestras de cielo claro y para toda condición de cielo (cielo claro + cielo cubierto + cielo parcialmente cubierto) que pasan los controles de calidad. Para la determinación de parámetros τ_{np} y p del modelo SSM se realizó un ajuste no lineal de optimización contra los datos experimentales. La obtención del valor para el modelo CTE se hizo mediante un ajuste lineal de los datos en el espacio (Q_{pt} , Q_{pi}) con intercepto nulo. El entrenamiento y la evaluación de los modelos se realizó utilizando un muestreo aleatorio estándar y el método de validación cruzada. En cada iteración, el 50 % de los datos se utilizó para el entrenamiento del modelo y el otro 50 % se utilizó para validación. Después de 1000 iteraciones, los coeficientes y el indicador de desempeño son promediados y reportados, lo que asegura repetitividad del procedimiento de ajuste/validación. En todos los ajustes de parámetros se verificó que el estadístico t fuese mayor a 3, lo que asegura significancia estadística en la estimación. En particular, y dada la gran cantidad de puntos experimentales de la Tabla 3, el mínimo valor de t fue de ~ 90 , obtenido para el parámetro p del modelo SSM. Como indicador de desempeño se utiliza el error cuadrático medio relativo a la media de las medidas (rRMSD) dado por la Ec. (4),

$$\text{rRMSD} (\%) = \frac{100}{\bar{\tau}_p} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\tau_p^{\text{est}}(i) - \tau_p^{\text{exp}}(i)]^2}, \quad (4)$$

donde τ_p^{est} y τ_p^{exp} son la transmitancia global PAR estimada por los modelos y experimental, respectivamente, y $\bar{\tau}_p^{\text{exp}}$ denota el promedio de las mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En acuerdo con los objetivos del trabajo, los resultados se agrupan en dos secciones. La primera busca responder ¿Qué desempeño se obtiene con los modelos de transmitancia global PAR para las coberturas nuevas?, y ¿qué ganancia de desempeño tiene el modelo de la Ec. (2) respecto al uso de un valor constante? La segunda sección se centra en responder ¿Qué cambios se producen en la transmitancia global PAR por la exposición de una cubierta en un invernadero productivo por un periodo de tres años? ¿Existe alguna diferencia de degradación entre una cubierta orientada al norte y otra orientada al sur?

Modelos de transmitancia PAR

Los parámetros obtenidos y el rRMSD asociados a cada modelo y cada cobertura (en estado nuevo) se presentan en la Tabla 4, para todo tipo de cielo y para condiciones de cielo claro. La Fig. 3 muestra los datos experimentales junto con el ajuste de ambos modelos para el film TT150 en toda condición de cielo. El comportamiento que se muestra es similar al de las otras coberturas analizadas. Fenomenológicamente se observa que el modelo SSM describe mejor las condiciones de cielo despejado (acumulación de puntos con regularidad en la Fig. 3), mientras que el valor constante tiende a describir mejor las condiciones nubladas (donde τ_p no muestra direccionalidad con θ). Esto se observa cuantitativamente en los indicadores del modelo SSM, para el cual se tiene un rRMSD menor al 3 % para las muestras de cielo despejado y un aumento a 4.5-6.5 % para toda condición de cielo. En cambio, el desempeño del valor constante (modelo CTE) no está notoriamente afectado por la diferencia de conjuntos, tendiendo a mejorar un poco para

Tabla 3: Codificación de cada cobertura. Se indican las muestras disponibles, la cantidad correspondiente a cielo claro, y el porcentaje que representan éstas del total.

Material (cobertura)	Datos disponibles	Cielo claro (CC)	% CC
TT150	3327	1889	56.7
TT120	4980	3144	63.1
AC150	4401	2160	49.1
AG150	3811	2713	71.1
Coberturas de recambio			
TT150N	3562	2034	57.1
TT150S	3256	2096	64.4
AG150N	3301	1341	40.6
AG150S	3555	1638	46.1

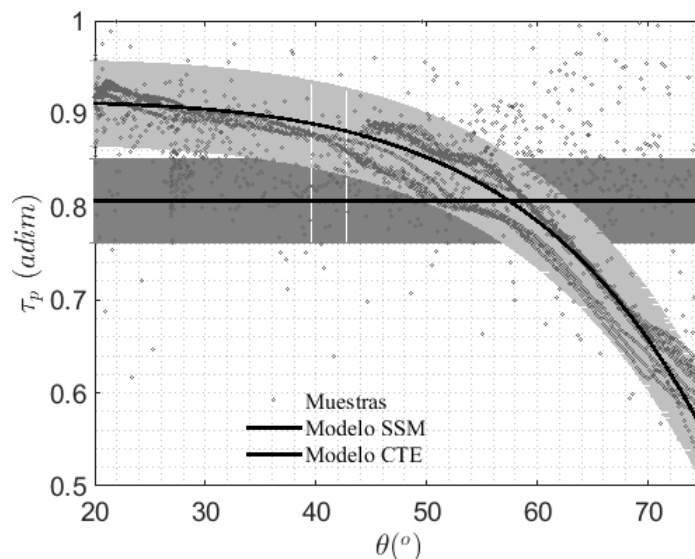


Figura 3: Ambos modelos contra datos experimentales para el TT150. Las bandas de sombreado, para SSM y CTE, representa la desviación estándar (≈ 0.09) de τ_p .

toda condición de cielo (el rRMSD va de 8 % a 11 % en cielo claro y de 7 % a 12.3 % en toda condición). En cualquier caso, el modelo SSM provee una mejor representación que el modelo CTE, incluso en toda condición de cielo, como muestran los indicadores. La ganancia de desempeño es, no obstante, mayor para las condiciones de cielo despejado.

El valor promedio de τ_p varía entre 0.78 y 0.84 para las cuatro coberturas (ver los valores del modelo CTE), y es menor en todos los casos al correspondiente τ_{np} , lo que es un comportamiento esperado. Es interesante notar que los valores de τ_p promedio obtenidos son muy similares en ambos conjuntos de datos. Esto se debe al comportamiento de τ_p ante condiciones de cielo claro, decreciente fuertemente con θ e iniciando en un valor alto, y ante condiciones de cielo nublado, donde no hay direccionalidad, pero se mantiene en un valor alto-intermedio, lo que conduce a valores promedio similares entre sí.

Tabla 4: Análisis para las coberturas nuevas.

Cobertura	Modelo SSM			Modelo CTE	
	τ_{np}	p	rRMSD	τ_{p2}	rRMSD
Todas las muestras					
TT150	0.89	4.2	6.3	0.83	11.0
TT120	0.85	4.6	6.2	0.82	8.4
AC150	0.82	4.4	6.5	0.78	10.0
AG150	0.88	4.8	4.5	0.84	8.0
Cielo Claro					
TT150	0.91	3.6	2.5	0.81	12.3
TT120	0.86	4.4	2.2	0.82	7.0
AC150	0.83	4.0	2.8	0.78	8.8
AG150	0.89	4.3	2.7	0.84	8.7

A partir del análisis anterior, nos enfocamos en lo que sigue en los resultados para la condición de cielo despejado. Cabe mencionar que esta es la condición de cielo en donde la recolección de energía PAR por parte de los cultivos es mayor. La Fig. 4 muestra el ajuste de los modelos a los datos experimentales de cielo claro, donde se observa la adecuación de la Ec. (2) al modelado de τ_p en estas condiciones. Para todas las coberturas estudiadas se observa que la transmitancia global PAR en incidencia normal, ajustada numéricamente para esta condición de cielo, está entre 0.83 y 0.91, lo que son valores elevados y esperados para coberturas de este tipo. Tanto τ_{np} como p presentan variaciones con la marca y modelo, pero también con el espesor, en forma no evidente. En particular, es de notar que se obtiene un valor de τ_{np} mayor para el modelo TT150 que para el modelo TT120, lo cual no es esperado a priori debido al espesor de cada uno. El valor estimado por el modelo es consistente con los datos experimentales de la Fig. 4. Esto podría deberse a diferencias en el proceso de producción de estos films, lo que agregaría otra dimensión para el análisis.

En la Fig. 5 se resumen los gráficos del modelo SSM en condiciones de cielo claro para cada cobertura. Allí se aprecian los diferentes comportamientos de τ_p en cielo despejado. Se observa que la cobertura TT150, de mayor espesor y transmitancia en incidencia normal estimada que la cobertura TT120, cae más rápidamente a partir de un ángulo de incidencia de 40° aproximadamente. En cambio, la cobertura TT120 presenta una transmitancia más uniforme hasta ángulos próximos a los 55° . El punto de cruce de ambas transmitancias se encuentra aproximadamente en $\theta \sim 58^\circ$.

Envejecimiento de cubiertas para invernaderos

Las coberturas de invernaderos luego de estar algún tiempo expuestas a condiciones climáticas de in-temperie (2 o 3 años) a simple vista se ven más opacas a la luz visible respecto a las coberturas nuevas. Sin embargo, el efecto sobre la transmitancia PAR no es tan acentuado como podría concluirse de esta observación cualitativa. En la gráfica de la Fig. 6 se muestra el comportamiento angular de τ_p para films nuevos y usados (luego de estar expuesto a condiciones de campo por 3 años) para las coberturas TT150 y AG150. Los subíndices N y S refieren respectivamente a las inclinaciones norte y sur de los techos de los invernaderos con tipología de capilla. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de ajuste del modelo SSM en condiciones de cielo despejado para las coberturas de recambio, el rRMSD resultante, y la variación relativa de cada parámetro respecto al mismo film nuevo. Se aprecia que la transmitancia PAR en incidencia normal disminuye en un 9-12 %. Se observa un efecto asociado a la orientación de la

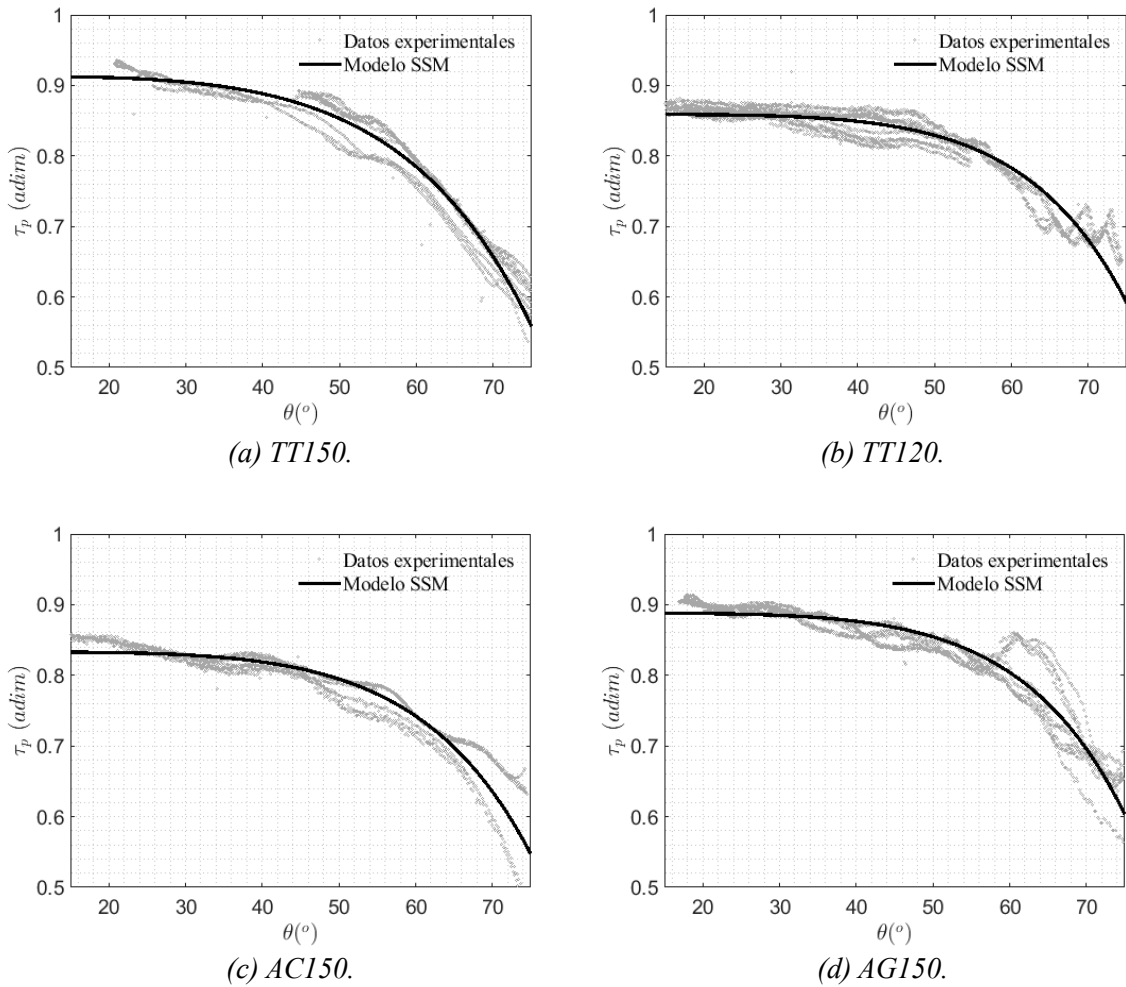


Figura 4: Ajuste del modelo SSM para cada cobertura en condiciones de cielo claro.

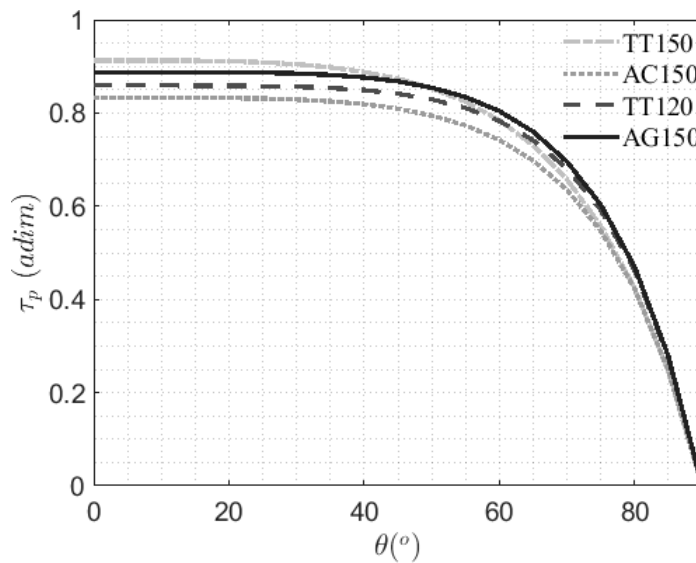


Figura 5: Modelo SSM para las cuatro coberturas nuevas, ajustado en condiciones de cielo claro.

cobertura respecto al movimiento aparente del Sol, dado que los films que se orientan al norte presentan una disminución de τ_{np} levemente mayor que los orientados al sur (del 2 % aproximadamente). Por otro

lado, el cambio en el parámetro p asociado al comportamiento angular del material, al parecer, varía con la marca de la cobertura. Para el TT150 se podría decir que el comportamiento angular es casi invariante con el tiempo, mientras que el AG150 presenta una variación próxima al 10 % en el parámetro p . Esto quiere decir que la transmitancia PAR de coberturas envejecidas cae más rápido angularmente que la transmitancia PAR de la misma cobertura pero sin uso. Para el modelo CTE (τ_p promedio) se aprecia una disminución del 7.2 y 6.6 % para el TT150 al norte y sur respectivamente, y de 13.2 y 10.1 % para el AG150. Se observa también para este modelo un mayor cambio de la cobertura AG150 y la diferencia antes mencionada entre la orientación norte y sur.

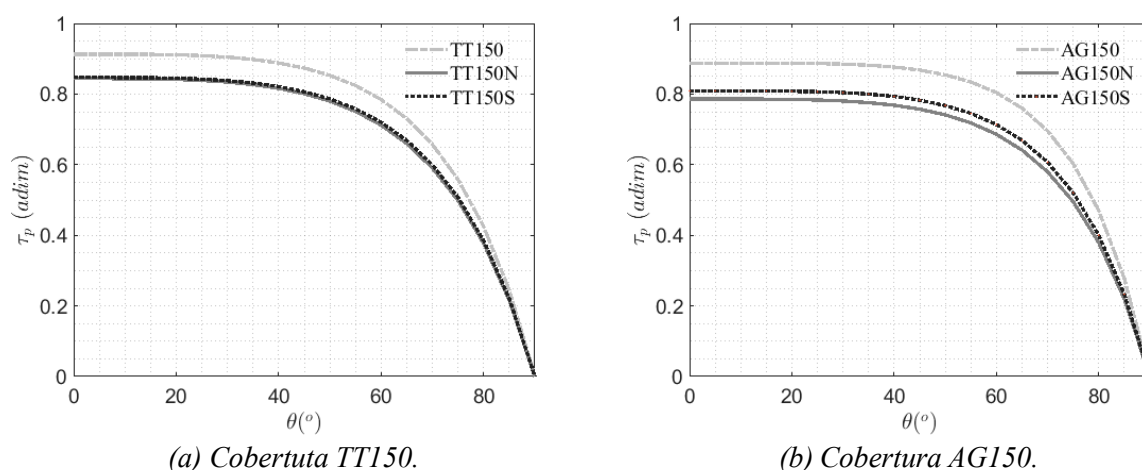


Figura 6: Comparación entre coberturas nuevas y usadas modeladas en condiciones de cielo claro.

Tabla 5: Ajuste y validación del modelo SSM para coberturas usadas en condiciones de cielo claro. Variación relativa de los parámetros entre las coberturas nuevas y con 3 años de uso.

Cobertura	τ_{np}	p	rRMSD	$\Delta\tau_{np}$ (%)	Δp (%)
TT150N	0.84	3.4	3.4	-11.6	-2.5
TT150S	0.85	3.5	1.6	-9.3	-2.8
AG150N	0.79	3.8	4.3	-11.2	-11.6
AG150S	0.81	3.9	3.0	-9.0	-9.3

CONCLUSIONES

En este trabajo se reporta el análisis del comportamiento de la transmitancia global PAR para ocho tipos de coberturas transparentes utilizadas como envolvente en invernaderos. Se parte de un ensayo experimental a Sol real y en condiciones controladas, donde destaca el cuidado por evitar la acumulación de agua sobre las cubiertas por condensación o precipitaciones, y por eliminar las arrugas que surgen debido a la dilatación térmica. Se analizan coberturas de uso típico en Uruguay para este fin, cuatro en estado nuevo y cuatro con utilización de 3 años en orientación norte y sur, con marcas y modelos coincidentes con dos de las nuevas. El trabajo demuestra que es posible aplicar la Ec. (2) para modelar la transmitancia PAR de este tipo de coberturas. Los resultados de este trabajo son un primer paso para incorporar con mayor precisión el modelado de la transmitancia PAR en invernaderos, considerando tipologías típicas.

A partir de los datos experimentales se puede apreciar que la transmitancia PAR de las cubiertas depende del fabricante, espesor, y modelo del mismo. La transmitancia global PAR promedio varía entre 0.78 y 0.84, con poca variación entre las muestras adquiridas en condiciones de cielo despejado y en toda condición de cielo. Se ajustaron y evaluaron dos modelos simples con potencial uso en la determinación

de transmitancia global PAR para ambas condiciones de cielo. El modelo SSM con dependencia angular y solo dos parámetros ajustables representa muy bien las condiciones de cielo despejado, con un rRMSD del 3 %. Su uso para toda condición de cielo aumenta el rRMSD a 6 %, no obstante, incluso en este caso, presenta un mejor desempeño que el modelo constante, que presenta rRMSD de 7-12.3 % para todo cielo y de 8-11 % para cielo claro. El uso en condiciones de cielo claro del modelo SSM permite estimar la transmitancia global PAR en incidencia normal, encontrándose valores entre 0.83 y 0.91, lo que es esperado para este tipo de cubiertas.

Finalmente, se evaluó el cambio en la transmitancia global PAR debido al envejecimiento de los films durante un uso de 3 años en un invernadero productivo. Aquí se apreció una disminución promedio de 9-12 % en la transmitancia en incidencia normal (parámetro τ_{np}), con un 2 % de diferencia dependiendo de si el uso de la cobertura fue orientado al norte o al sur. La disminución en esta variable fue similar para ambas marcas consideradas. En cambio, el parámetro que regula el comportamiento angular del modelo (p) presentó una variación importante con la marca, lo que es un aspecto a profundizar en trabajos futuros considerando una mayor cantidad de marcas y modelos.

Este trabajo demuestra que la utilización del modelo SSM es una mejora respecto a la utilización de un valor constante, de uso extendido en la práctica. Los resultados obtenidos, al usar como fuente la irradiancia solar real, son aplicables a la transmitancia de coberturas semitransparentes reales siempre que se ajusten los parámetros a los datos. En un invernadero real, sería necesario calcular el ángulo de incidencia solar de cada superficie semitransparente expuesta al Sol (para las que no reciben radiación directa bastaría usar un valor constante). Esto puede realizarse en forma automatizada, a partir de la ubicación, hora y orientación de la superficie (Iqbal, 1983). En Python, existen bibliotecas como PVlib (Holmgren et al., 2018) que realizan estos cálculos en forma sencilla para el usuario. En vista de lo observado en este trabajo, si se requiere un análisis preciso de un invernadero dado, se recomienda ensayar y modelar la transmitancia PAR de la cobertura empleada. La variabilidad de la transmitancia y los parámetros para cada tipo de film, entre marcas y entre diferentes partidas de una misma marca, así como el impacto de esta variabilidad en el modelado de invernaderos, son aspectos interesantes a abordar en trabajos futuros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República por el apoyo financiero a través de su programa de Grupos de I+D.

REFERENCIAS

- Akitsu, T., Kume, A., Hirose, Y., Ijima, O., y M., N. K. (2015). On the stability of radiometric ratios of photosynthetically active radiation to global solar radiation in Tsukuba, Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209-210:59–68.
- Aldaftari, H. A., Okajima, J., Komiya, A., y Maruyama, S. (2019). Radiative control through greenhouse covering materials using pigmented coatings. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*.
- Di-Laccio, J. L., Russo, P., Monetta, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2023). Atmospheric dependence of the direct, diffuse, and global clear-sky conversion ratios between solar photosynthetic active irradiance and photon flux. En evaluación en el *Agricultural and Forest Meteorology Journal*. Preprint disponible en http://les.edu.uy/papers/preprint_PAR-ratios-modeling.pdf.
- Giacomelli, G. A., Ting, K. C., y S., P. (1988). Solar par vs. solar total radiation transmission in a greenhouse. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 31(5):1540–1543.
- Holmgren, W., Hansen, C., y Mikofski, M. (2018). Pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3.
- Iglesias, N. y Muñoz, A. (2007). Comparación de la transmisión de la radiación fotosintéticamente activa (par) en invernaderos. *Horticultura Argentina*, 60(26):10–16.

- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press.
- Kittas, C. y Baille, A. (1998). Determination of the spectral properties of several greenhouse cover materials and evaluation of specific parameters related to plant response. Journal of Agricultural Engineering Research, 71(2):193–202.
- Kittas, C., Baille, A., y Giaglaras, P. (1999). Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research, 73(4):341–351.
- LI-COR (2023). LI-COR. Support: LI-190R and LI-191R Quantum Sensors. Dirección URL: <<https://www.licor.com/env/support/LI-190R-and-LI-191R/topics/quantum-performance.html#LI-190R>> [consulta: 16 de enero de 2023].
- Reno, M. J. y Hansen, C. W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of ghi measurements. Renewable Energy, 90:520–531.
- Schultz, J. M. y Svendsen, S. (1998). Winsim: A simple simulation program for evaluating the influence of windows on heating demand and risk of overheating. Solar Energy, 63(4):251–258.

GLOBAL PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE TRANSMITTANCE MODELING OF MATERIALS EMPLOYED FOR GREENHOUSES IN URUGUAY

ABSTRACT: This work studies the photosynthetically active solar radiation (PAR) global transmittance of different coverings (films) used in greenhouses. Four coverings in their factory state and four coverings with a three-year utilization are included. These latter films were used in a real greenhouse with northern and southern orientation. Two of the new films are of the same brand and model as those that were used. An empirical model commonly used for broadband global transmittance for other surfaces is adapted to global PAR transmittance. This model uses as input the angle of incidence (θ) of the direct beam to the surface and has two adjustable parameters (τ_{np} and p). The use of a constant transmittance is also included as a reference. It is observed that the adapted model performs better than the constant value for all sky conditions and clear skies, reproducing the clear-sky global PAR transmittance with very low uncertainty. The three-year films' transmittance degradation is evaluated at 9-12 %, with a 2 % downgrade difference between their utilization with northern or southern orientation.

Keywords: PAR transmittance, greenhouse covers, coverage degradation, PAR transmittance models.

VALIDAÇÃO DA BASE DE DADOS NSRDB DE ESPECTRO DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL PARA A CIDADE DE PETROLINA – BRASIL

Janis Joplim Bezerra Galdino¹, Olga de Castro Vilela¹, Naum Fraidenraich¹, Christian Gueymard²

¹Centro de Energias Renováveis – Departamento de Energia Nuclear – Centro de Tecnologias e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco

²Solar Consulting Services - Colebrook, NH 03576, Estados Unidos.
e-mail: janis.joplim@ufpe.br

RESUMO: Com a disponibilidade de dados do espectro da irradiância solar proveniente da NREL-NSRDB englobando toda a América do Sul, torna-se importante a validação dessa base para regiões com dados observacionais. O presente trabalho analisa o desempenho da simulação da NSRDB do espectro da irradiância global horizontal para Petrolina, cidade localizada no semiárido do nordeste brasileiro. A validação engloba as sincronizações temporal e de comprimentos de onda dos dados da NSRDB e observados, e também a aplicação de um filtro gaussiano para casar a resolução do espectro de GHI simulado com a dos espectralradiômetros utilizados para as medições no intervalo de 300 a 1700 nm. Os dados da NSRDB foram analisados de forma global, por faixa do espectro solar (ultravioleta, visível e infravermelho) e para os momentos de céu claro. A irradiância obtida através da integral do espectro de GHI também foi avaliada. Para 4408 espectros observados entre os anos de 2018 e 2021, os valores de RMSE normalizado para o espectro de GHI variou de 16,03 % para os momentos de céu claro e 52,80 % para todos os céus, indicando que a acurácia do modelo da NSRDB é significativamente afetada pela cobertura de nuvens sob o clima de Petrolina.

Palavras chave: espectro da irradiância solar, NSRDB, radiação solar, energia solar, espectralradiômetro.

INTRODUÇÃO

A radiação solar é um conjunto de ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol distribuídas em uma faixa de comprimentos de onda (ou frequências), que vai desde aproximadamente 200 a 4000 nm. Para o estudo do comportamento da radiação solar, a irradiância global horizontal (GHI) é uma variável imprescindível, sendo comumente medida em estações solarimétricas ou meteorológicas através de piranômetros. Porém, seu valor representa a integral (soma) das energias de todas as ondas eletromagnéticas dentro da sua faixa de medição. A irradiância espectral, medida através de um espectralradiômetro, descreve com maior detalhamento a radiação solar, já que fornece a distribuição da irradiância ao longo dos comprimentos de onda. Esse detalhamento permite entender melhor as interações dos materiais com a radiação, já que as propriedades de absorção, transmitância, espalhamento, reflexão e emissão de cada material variam de acordo com o comprimento de onda. Dados do espectro da radiação solar são importantes em diversas aplicações como nos estudos das mudanças climáticas (Xu e Cui, 2021; Bornman et al., 2019), nos impactos da radiação na vida terrestre (Benelli et al., 2020; Miyauchi e Nakajima, 2016), na ciência e tecnologia dos materiais e na avaliação da geração de energia solar (Polo et al., 2017; Dirnberger et al., 2015).

Contudo, dados observacionais da irradiância espectral são raros, pois não é comum ter em estações solarimétricas instrumentos de medição do espectro solar, como espectralradiômetros. Para contornar isso, foram desenvolvidos modelos para simulação da irradiância solar espectral. Os mais difundidos na literatura possuem uma abordagem física, baseada na resolução de equações de transferência radiativa da atmosfera, como o libRadtran (Mayer et al., 2012) e o SMARTS (*Simplified Model of Atmospheric*

Radiative Transfer of Sunshine; Gueymard, 1995; Gueymard, 2019), que empregam vários parâmetros atmosféricos como entrada, como quantidade de água precipitável, profundidade óptica de aerossóis (AOD, *Aerosol Optical Depth*) e concentração de gases atmosféricos (por exemplo, ozônio). Por sua vez, esses parâmetros atmosféricos costumam ser obtidos através de fotômetros solares em estações terrestres (por exemplo, estações AERONET – *Aerosol Robotic Network*), sensores de satélite, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites AQUA e TERRA ou por modelos de reanálise da circulação global da atmosfera, como a CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) e o MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*). Com a finalidade de fornecer informações mais detalhadas da radiação solar, o centro de pesquisa americano NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) criou a base de dados NSRDB (*National Solar Radiation Database*) que disponibiliza gratuitamente dados da irradiância espectral para qualquer ângulo de incidência, empregando dados do MERRA-2 para parâmetros atmosféricos e as imagens do satélite geostacionário GOES para obter informações sobre cobertura e tipo de nuvens. A NSRDB combina as simulações de irradiância espectral de céu claro do SMARTS com a parametrização robusta dos efeitos das nuvens do libRadtran para simular a irradiância espectral com os efeitos da cobertura de nuvens através do modelo FARMS-NIT (*Fast All-Sky Model for Solar Applications – Narrowband Irradiance on Tilted-Surface*; Xie e Sengupta, 2018; Xie et al., 2019). Como saída, a NSRDB é capaz de fornecer simulações do espectro em escala horária para 450 ângulos de visão do céu em 2002 comprimentos de onda, de 0,28 μm até 4 μm (Xie et al., 2019). Diversos estudos utilizaram a base de dados da NSRDB em diferentes aplicações. Em relação à energia fotovoltaica, Ripalda et al. (2020) calcularam para os Estados Unidos o impacto do espectro solar na produção de energia de módulos silício cristalino (c-Si), perovskita e telureto de cádmio (CdTe) em sistemas fixos e com rastreamento, usando como base os dados de espectro da NSRDB. Trabalhos similares foram realizados analisando o impacto do espectro em módulos de multijunção (Warmann e Atwater, 2016; Warmann e Atwater, 2019) e expandindo a avaliação para outros lugares na América Central e do Sul (Kinsey, 2021).

A validação da base de dados de irradiância espectral da NSRDB é importante para garantir confiabilidade aos estudos que a utiliza, avaliando se ela representa bem o comportamento da localidade de interesse. Pelland e Gueymard (2022) compararam os espectros médios para o ano de 2014 para a cidade de Golden nos EUA obtidos através de medições com um espectroradiômetro EKO WISER e por meio da base de dados NSRDB e observaram que o espectro simulado superestima a irradiância abaixo de 500 nm e subestima para comprimentos de onda maiores. Eles apontam como uma possível causa uma subestimação dos valores de AOD e/ou uma baixa acurácia dos modelos de transmitância de aerossol. Resultados similares também verificados por Xie et al. (2021) para outras localidades dos EUA. Por ter inicialmente sido disponibilizado para o território estadunidense, grande parte dos estudos científicos que utilizam a base da NSRDB se concentram nessa região. Porém, atualmente sua área de cobertura inclui também toda a América do Sul. Como uma maneira de ampliar os estudos sobre a base de dados da NSRDB de irradiância espectral, o objetivo deste trabalho é verificar a acurácia das simulações em representar o espectro de GHI para a cidade de Petrolina, localizada na região do semiárido do nordeste do Brasil. Para isso, foram utilizados dados observacionais do espectro de GHI desde o ano de 2018 até 2021, incluindo dias de céu claro e com cobertura de nuvens.

METODOLOGIA

Origem dos dados

Os dados observacionais utilizados neste estudo são provenientes da estação solarimétrica da Plataforma Solar de Petrolina, localizada no estado de Pernambuco, no semiárido do nordeste brasileiro, cujas coordenadas geográficas são latitude -9.39° , longitude -40.5° , altitude s.n.m. 387 metros. Além de instrumentos para medição de dados radiométricos e meteorológicos, a estação solarimétrica possui dois espectroradiômetros EKO WISER nos modelos MS-711 e MS-712, mostrados na Figura 1. Juntos, os espectroradiômetros fornecem medições do espectro de GHI compreendendo a faixa de 300 a 1700 nm, com intervalo de 1 nm. A série temporal dos dados observacionais incluem 425 dias entre o período de setembro de 2018 até dezembro de 2021 com resolução temporal de 1 minuto.

Para obter os dados do espectro de GHI da base de dados da NSRDB, é necessário realizar uma

solicitação no site da plataforma (<<https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>>) selecionando a opção “*Spectral On-demand*”, fornecendo informações sobre as coordenadas geográficas do local de interesse e para qual ano se deseja obter os dados. O modelo FARMS-NIT do NSRDB pode ser aplicado para gerar os espectros de irradiância solar para planos com diversas inclinações, com opção de utilizar um plano fixo (*fixed tilted*) ou realizar rastreamento solar de um eixo (*I axis tracking*). Como os dados observacionais são exclusivamente de GHI, foram selecionadas as opções para obter o espectro para o plano horizontal para os anos de 2018 a 2021. A base de dados da NSRDB fornece dados horários em tempo universal coordenado (UTC), baseados nas imagens fornecidas pelo satélite GOES. O espectro de GHI da NSRDB está compreendido na mesma faixa simulada pelo SMARTS, de 280-4000 nm com resolução variável ao longo dos comprimentos de onda, 0,5 nm para a faixa de 280-400 nm, 1 nm para a faixa de 400-1700 nm, e 5 nm para a faixa de 1700-4000 nm.



Figura 1: Espectroradiômetros EKO WISER nos modelos MS-711 (à esquerda) e MS-712 (à direita) da Plataforma Solar de Petrolina.

Validação da base de dados NSRDB

Os dados observacionais da Plataforma Solar de Petrolina e as simulações da NSRDB possuem diferenças tanto em relação à resolução temporal quanto à resolução em comprimentos de onda. As medições da irradiância espectral da Plataforma Solar de Petrolina estão registradas em horário local (GMT -3) enquanto que a base de dados NSRDB está em UTC. Por essa razão, foi necessário primeiramente sincronizar as duas bases de dados. Além disso, os espectroradiômetros (MS-711 e MS-712) possuem resolução de 6,5 nm, que é diferente da NSRDB, como descrito anteriormente. Apesar de os dados observacionais terem um intervalo de 1 nm, a medição de um dado comprimento de onda também leva em consideração as medições da irradiância nos comprimentos de onda vizinhos, de acordo com a resolução do instrumento (Xue et al., 2021). Por isso, foi aplicado um filtro gaussiano nos dados da NSRDB, utilizando como parâmetro de largura completa na metade do máximo (FWHM, do inglês, *Full Width at Half Maximum*) de 6,5 nm. As Equações 1 a 4 descrevem o procedimento realizado para aplicar o filtro gaussiano nos dados da NSRDB (Gueymard, 2001). A Figura 2 mostra um exemplo da irradiância espectral da NSRDB com e sem a aplicação do filtro gaussiano.

$$W(\lambda) = \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma = FWHM \cdot (8 \ln(2))^{-0,5} \cong 2,76 \quad (2)$$

$$\bar{\chi}(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda_c - \Delta\lambda}^{\lambda_c + \Delta\lambda} W(\lambda) X(\lambda)}{\sum_{\lambda_c - \Delta\lambda}^{\lambda_c + \Delta\lambda} W(\lambda)} \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = \frac{FWHM}{d\lambda} + 3 \quad (4)$$

onde:

λ = comprimento de onda

λ_c = comprimento de onda onde ocorre o pico da irradiância

$d\lambda$ = intervalo entre dois comprimentos de onda consecutivos, neste caso, 1 nm

$W(\lambda)$ = operador do filtro gaussiano para o comprimento de onda λ

$X(\lambda)$ = valor da irradiância para o comprimento de onda λ

$\bar{X}(\lambda)$ = valor da irradiância para o comprimento de onda λ após aplicação do filtro

Após a aplicação do filtro gaussiano, foi realizada a sincronização dos comprimentos de onda dos espectros da NSRDB com a observação, sendo selecionados dos dados da NSRDB somente os valores para os comprimentos de onda entre 300 nm a 1700 nm em um intervalo de 1 nm. O procedimento da validação da base de dados NSRDB do espectro de GHI está descrito na Figura 3.

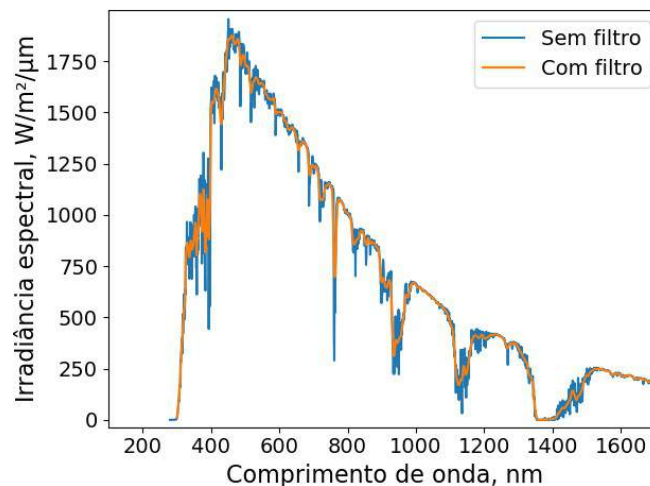


Figura 2: Irradiância espectral da NSRDB com e sem a aplicação do filtro gaussiano.

Para a validação do espectro de GHI da NSRDB para Petrolina, foram utilizados os estatísticos RMSE (*Root Mean Squared Error*), nRMSE (RMSE normalizado pela média da observação), MBE (*Mean Bias Error*), razão dos desvios padrões entre as bases de dados (STDr) e o coeficiente de correlação (COR). A irradiância integrada resultante das duas bases de dados também foi comparada. A avaliação dos dados do espectro de GHI da NSRDB foi realizada de forma global e de acordo com as regiões do espectro solar (ultravioleta – UV, comprimento de onda até 400 nm; visível – VIS, comprimento de onda entre 400 e 700 nm; e infravermelho – IV, comprimento de onda a partir de 700 nm). Além disso, utilizando o algoritmo Bright-Sun (Bright et al., 2020) e as medições de GHI da estação solarimétrica da Plataforma Solar de Petrolina, foram detectados os momentos de céu claro para avaliar a representatividade da base de dados NSRDB para esses instantes.

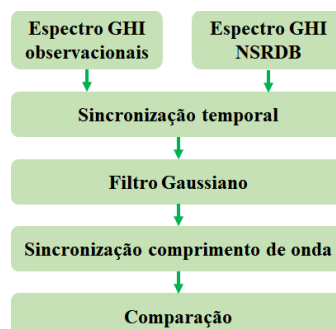


Figura 3: Procedimento de validação da base de dados NSRDB para Petrolina.

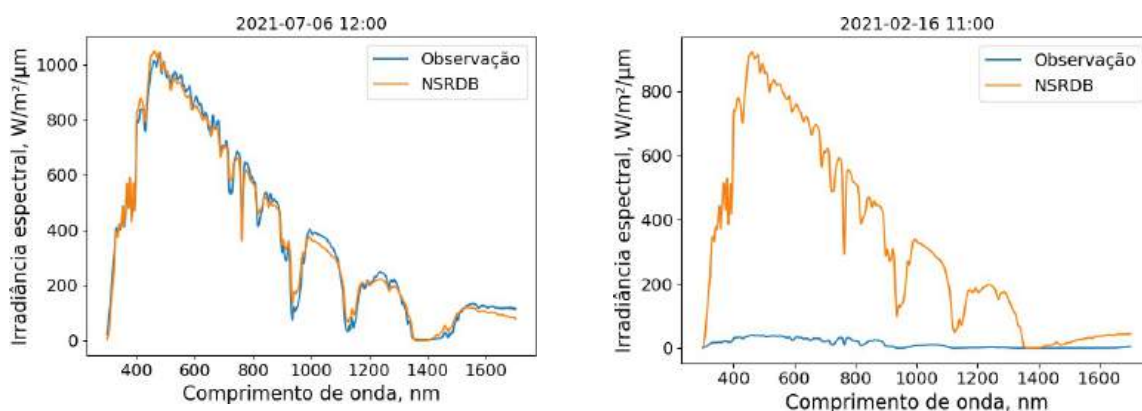
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após os procedimentos de sincronização temporal e de comprimentos de onda, ao todo foram analisados 4408 espectros de GHI, dentre eles 270 foram detectados como momentos de céu claro pelo algoritmo Bright-Sun. A Tabela 1 mostra os estatísticos obtidos na validação dos dados de espectro de GHI da NSRDB para a cidade de Petrolina para todos os céus e somente para os momentos de céu claro, mostrando separadamente a análise para as regiões UV, VIS e IV do espectro solar. Pode-se observar que a NSRDB apresenta um aumento significativo no erro e uma piora nos outros estatísticos (correlação e razão de desvios padrões) para todos os céus em relação aos momentos de céu claro, com o nRMSE passando de 16,03 % para 52,80 %. Além disso, de modo geral, a NSRDB tem um desempenho pior para reproduzir a faixa de radiação IV, mas, ao analisar somente os momentos de céu claro, o erro maior está na região do UV. Em ambos os casos, a faixa de radiação VIS apresenta o melhor desempenho.

Tabela 1: Estatísticos da validação da base de dados da NSRDB para espectro de GHI para a cidade de Petrolina para todos os céus e para os momentos de céu claro.

TODOS OS CEUS					
Faixa	RMSE (W/m ² /μm)	nRMSE (%)	MBE (W/m ² /μm)	COR	STDr
UV	163,01	50,09	84,58	0,84	1,18
VIS	331,09	40,33	57,89	0,79	0,85
IV	127,19	55,12	14,53	0,76	0,88
Total	192,19	52,80	28,86	0,78	0,95
CEU CLARO					
Faixa	RMSE (W/m ² /μm)	nRMSE (%)	MBE (W/m ² /μm)	COR	STDr
UV	101,49	36,59	73,20	0,98	1,23
VIS	78,51	10,57	-1,30	0,99	0,99
IV	31,13	15,39	-6,67	0,99	0,93
Total	53,35	16,03	0,24	0,99	0,98

A Figura 4 mostra alguns espectros de GHI observados e obtidos pela NSRDB com destaque para os instantes de menor nRMSE, 6,93 % (Figura 4-a), e maior nRMSE, 3314,01 % (Figura 4-b), para um instante com alta cobertura de nuvens em que a NSRDB simulou incorretamente ser um momento de céu claro. Os outros instantes mostrados nas Figura 4-c e Figura 4-d apresentam um nRMSE de 41,90 % e 10,90 %, respectivamente. Nota-se que os erros bastante elevados foram provocados majoritariamente por uma baixa acurácia na simulação da cobertura de nuvens e, possivelmente, pela incerteza causada por, por exemplo, nos dados de entradas de aerossóis. Além disso, para os momentos em que a NSRDB conseguiu reproduzir bem o comportamento do espectro local, observa-se uma tendência de superestimação para a faixa de radiação abaixo de 500 nm e subestimação para regiões de comprimento de onda maiores, o que pode também ser visto no MBE apresentado na Tabela 1 para momentos de céu claro (negativo para região de radiação IV e positivo para a UV). Resultados similares foram reportados em Pelland e Gueymard (2022) e Xie et al. (2021), que indicaram como possível causa a simulação da transmitância de aerossóis.



a)

b)

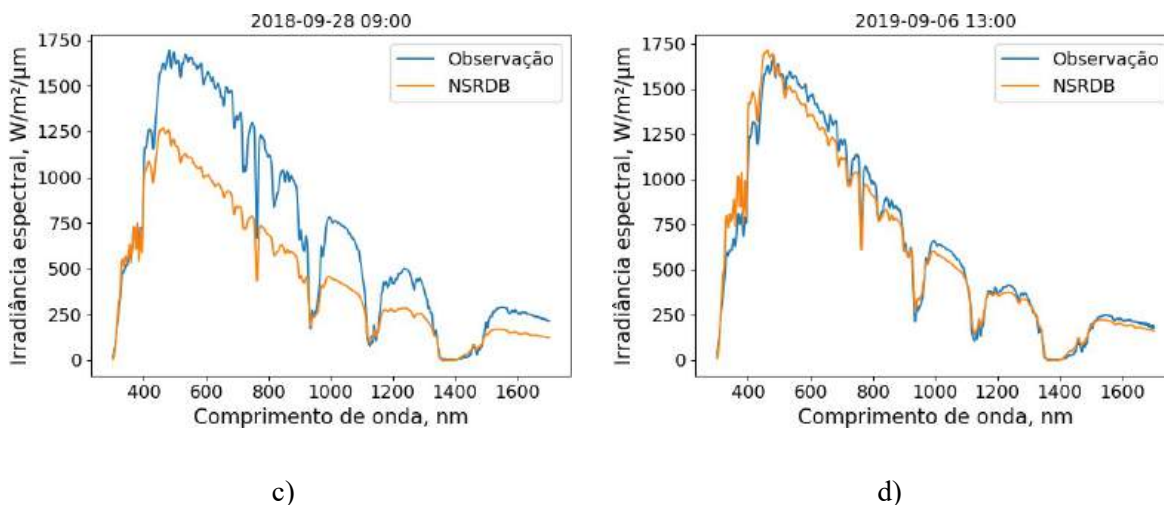


Figura 4: Espectros de GHI observados e obtidos pela NSRDB para os instantes de a) 06/07/2021 às 12h00 com nRMSE de 6,93 %; b) 16/02/2021 às 11h00 com nRMSE de 3314,01 %; c) 28/09/2018 às 09h00 com nRMSE de 41,90 %; e d) 06/09/2019 às 13h00 com nRMSE de 10,90 %.

Os valores de nRMSE também foram discriminados de acordo com o comprimento de onda, como mostra a Figura 5. Pode-se observar erros bastante elevados, até superiores a 100 % em algumas regiões do espectro, onde há absorção por ozônio (abaixo de 330 nm) e por vapor d'água (acima de 800 nm), resultando em valores muito baixos de irradiância e, conseqüentemente, valores muito altos de nRMSE ao se realizar a normalização. Ao se observar o comportamento global, nota-se que o nRMSE se mantém em um valor médio de um pouco mais de 40 % para todos os céus e 10 % para os momentos de céu claro, com um pico na região do UV.

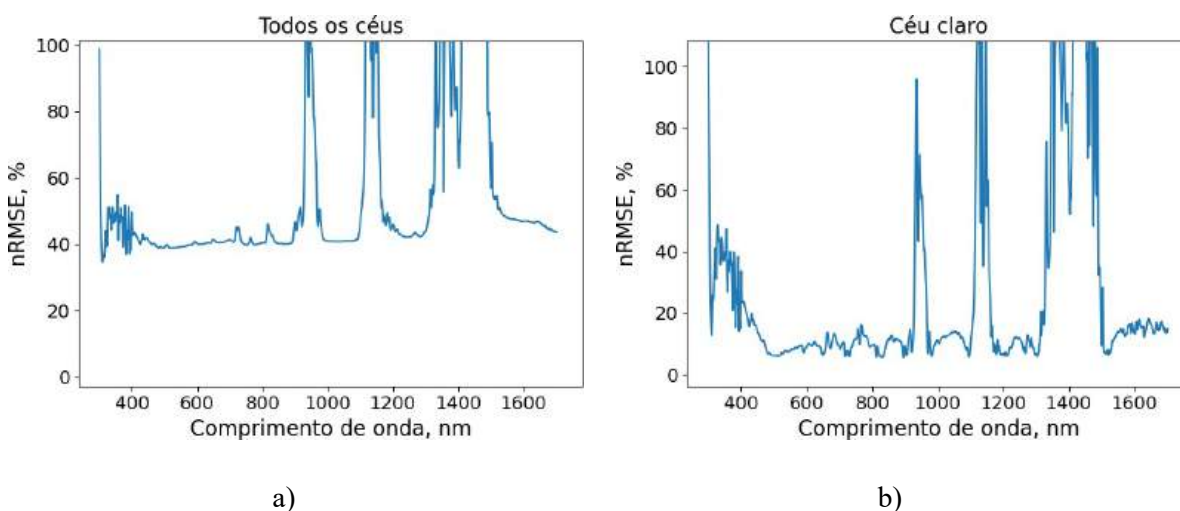


Figura 5: nRMSE do espectro de GHI a base de dados da NSRDB distribuído por comprimento de onda.

Além disso, foi verificada uma tendência no aumento do nRMSE com a massa de ar, como mostra a Figura 6. Resultados similares foram reportados por Galdino et al. (2022) para simulações do espectro de GHI realizadas com o SMARTS para a Plataforma Solar de Petrolina. Esse aumento no nRMSE possivelmente está relacionado com a propagação de erros de imprecisão ou baixa acurácia nos parâmetros atmosféricos de entrada para a simulação do SMARTS.

Foram analisados também os valores de irradiância obtidos a partir da integral do espectro de GHI para o intervalo de 300-1700 nm. A Figura 7 mostra a comparação entre a irradiância integrada observada e obtida pela NSRDB para um período da série temporal e a Tabela 2 mostra os estatísticos encontrados

através desta validação para todos os céus e somente para os momentos de céu claro. Pode-se observar que a NSRDB consegue reproduzir muito bem o comportamento da irradiância integrada de GHI para os momentos de céu claro, com um nRMSE baixo, 5,34 %, porém, ao analisar todos os céus, o nRMSE passa para 40,70 %, indicando mais uma vez dificuldades em obter informações precisas em relação à real cobertura de nuvens e/ou seus efeitos no espectro solar.

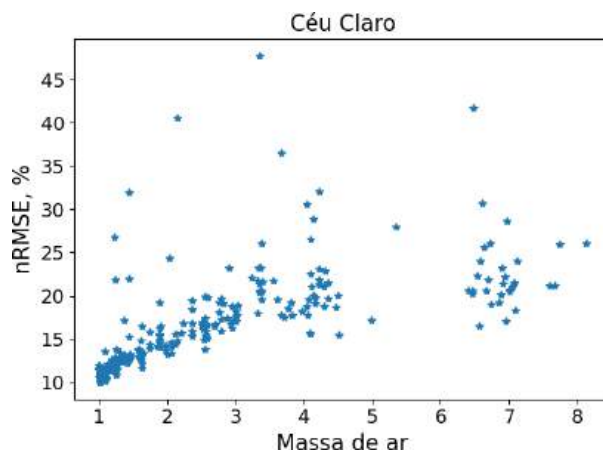


Figura 6: Variação do nRMSE com a massa de ar para os momentos de céu claro.

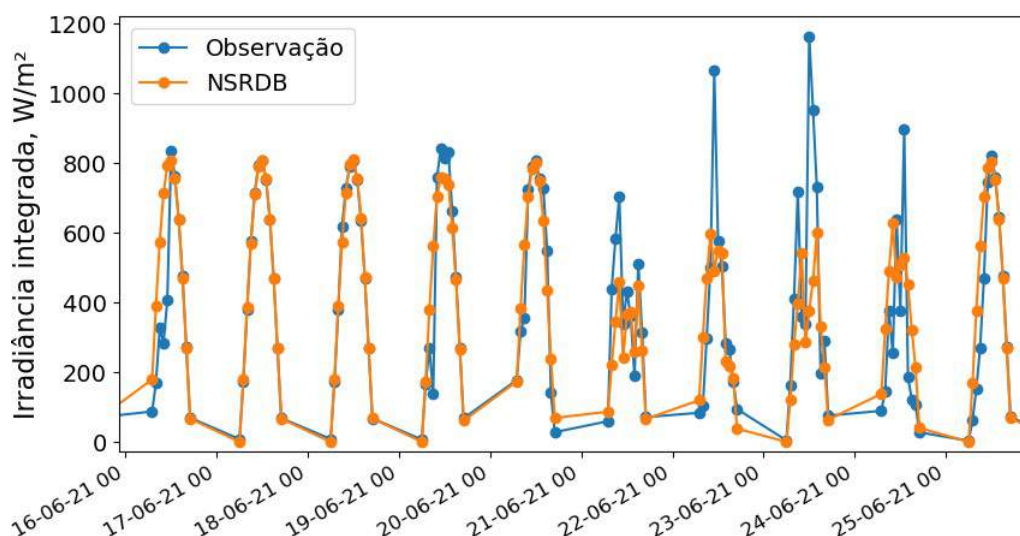


Figura 7: Irradiância integrada dos espectros de GHI observados e obtidos da NSRDB.

Tabela 2: Estatísticos da validação da NSRDB para integral do espectro de GHI para a cidade de Petrolina para todos os céus e para os momentos de céu claro.

Irradiância integrada					
	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	MBE (W/m ²)	COR	STDr
Todos os céus	207,50	40,70	40,45	0,78	0,84
Céu claro	24,90	5,34	0,34	0,99	0,99

CONCLUSÕES

A validação realizada neste trabalho contribui para os estudos da irradiância solar espectral na região do semiárido do nordeste brasileiro, avaliando a base de dados NSRDB que está disponível para toda a

América. Além disso, poucos trabalhos utilizaram os dados de espectro da NSRDB para locais diferentes dos Estados Unidos, os resultados aqui apresentados colaboram para a avaliação desta base.

A saída do NSRDB foi significativamente melhor para os momentos de céu claro em comparação com todos os céus, tanto em relação ao espectro de GHI e à irradiância integrada, o que indica que há uma baixa acurácia no modelo FARMS-NIT em simular o efeito das nuvens no espectro solar, causada principalmente em falhas classificação dos instantes em céu claro ou com cobertura de nuvens. Os valores de nRMSE para o espectro de GHI foi de 52,80 % e 16,03 % para todos os céus e para momentos de céu claro, respectivamente. Foi observada também uma tendência de aumento do erro do espectro da NSRDB para massas de ar mais elevadas. Considerando a irradiância integrada entre 300 e 1700 nm, o valor de nRMSE encontrado foi baixo, 5,34 %, para momentos de céu claro, mas passa para 40,70 % quando se leva em consideração todos os céus.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por meio do projeto 23076.009704/2020-56 no âmbito do Programa de P&D ANEEL, como também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio aos bolsistas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares -PROTEN.

REFERÊNCIAS

- Benelli, A., Cevoli, C., & Fabbri, A. (2020). In-field hyperspectral imaging: An overview on the ground-based applications in agriculture. *Journal of Agricultural Engineering*, 51(3), 129-139.
- Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robson, T. M., Robinson, S. A., Jansen, M. A., Ballaré, C. L., & Flint, S. D. (2019). Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 18(3), 681-716.
- Bright, J. M., Sun, X., Gueymard, C. A., Acord, B., Wang, P., & Engerer, N. A. (2020). Bright-Sun: A globally applicable 1-min irradiance clear-sky detection model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109706.
- Dirnberger, D., Blackburn, G., Müller, B., & Reise, C. (2015). On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, 431-442.
- Galdino, J. J. B., de Castro Vilela, O., Fraidenaich, N., Muniz, H., Pereira, A. C., Jatoba, E. B., ... & de Melo Filho, J. B. (2022). Irradiância espectral em Petrolina-Brasil: caracterização e validação de simulações. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 13(1), 20-29.
- Gueymard, C. (1995). SMARTS2: a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Florida Solar Energy Center.
- Gueymard, C. A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5), 325-346.
- Gueymard, C. A. (2019). The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra. *Solar Energy*, 187, 233-253.
- Kinsey, G. S. (2021). Solar cell efficiency divergence due to operating spectrum variation. *Solar Energy*, 217, 49-57.
- Mayer, B., Kylling, A., Emde, C., Hamann, U., & Buras, R. (2012). libRadtran user's guide. Edition for libRadtran version, 1.
- Miyauchi, M., & Nakajima, H. (2016). Determining an effective UV radiation exposure time for vitamin D synthesis in the skin without risk to health: simplified estimations from UV observations. *Photochemistry and photobiology*, 92(6), 863-869.
- Pelland, S., & Gueymard, C. A. (2022). Validation of Photovoltaic Spectral Effects Derived From Satellite-Based Solar Irradiance Products. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(6), 1361-1368.
- Polo, J., Alonso-Abella, M., Ruiz-Arias, J. A., & Balenzategui, J. L. (2017). Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies. *Solar Energy*, 142, 194-203.
- Ripalda, J. M., Chemisana, D., Llorens, J. M., & García, I. (2020). Location-specific spectral and thermal effects in tracking and fixed tilt photovoltaic systems. *Iscience*, 23(10).

- Warmann, E. C., & Atwater, H. A. (2016, June). Predicting energy production for multijunction photovoltaics: Effects of spectral variation and cumulative irradiance. In 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (pp. 0577-0579). IEEE.
- Warmann, E. C., & Atwater, H. A. (2019). Predicting geographic energy production for tandem PV designs using a compact set of spectra correlated by irradiance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(6), 1596-1601.
- Xie, Y., Habte, A., Sengupta, M., & Vignola, F. (2021). An Evaluation of the Spectral Irradiance Data from the NSRDB (No. NREL/TP-5D00-80439). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); Univ. of Oregon, United States.
- Xie, Y., & Sengupta, M. (2018). A fast all-sky radiation model for solar applications with narrowband irradiances on tilted surfaces (FARMS-NIT): Part I. The clear-sky model. *Solar Energy*, 174, 691-702.
- Xie, Y., Sengupta, M., & Wang, C. (2019). A fast all-sky radiation model for solar applications with narrowband irradiances on tilted surfaces (FARMS-NIT): Part II. The cloudy-sky model. *Solar Energy*, 188, 799-812.
- Xu, Y., & Cui, G. (2021). Influence of spectral characteristics of the Earth's surface radiation on the greenhouse effect: Principles and mechanisms. *Atmospheric Environment*, 244, 117908.

VALIDATION OF THE NSRDB DATABASE OF GLOBAL HORIZONTAL SPECTRAL IRRADIANCE FOR THE CITY OF PETROLINA – BRAZIL

ABSTRACT: With the availability of spectral solar irradiance data from the NREL-NSRDB service covering all of South America, it is desirable to validate this database at any site with observational data. The present work analyzes the performance of the NSRDB modelled data of global horizontal spectral irradiance for the city of Petrolina, located in a semi-arid region of northeastern Brazil. The validation procedure includes the temporal and wavelength synchronizations of the NSRDB time series with the observed data, as well as the application of a Gaussian filter to match the spectral resolution of the simulated GHI spectrum with that of the spectroradiometers used for the measurements over the observed spectral range (300–1700 nm). The NSRDB GHI spectrum data were analyzed in different ways: as a whole, by solar spectrum band (ultraviolet, visible, and infrared), and for clear-sky moments. The broadband irradiance obtained by summation of the GHI spectrum was also evaluated. For 4408 spectra recorded during 2018–2021, the normalized RMSE of the modelled GHI spectrum varied between 16.03% for clear-sky periods and 52.80 % under all-sky conditions, indicating that the accuracy of the NSRDB spectral model is significantly affected by cloudiness under Petrolina's climate.

Keywords: solar irradiance spectrum, NSRDB, solar radiation, solar energy, spectroradiometer.

CONTROL DE CALIDAD DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL OBTENIDOS POR ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS

Fernando Nollas¹, Pablo F. Orte^{2,3}, Julián Lell², Rodrigo Alonso-Suarez⁴, German A. Salazar^{3,5}

¹Servicio Meteorológico Nacional. SMN. Av. Dorrego 4019, CABA. CP: 1427. Argentina.

²Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa. CITEDEF, Argentina.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. CONICET. Argentina.

⁴Laboratorio de Energía Solar. LES. Uruguay.

⁵INENCO-CONICET, Avenida Bolivia 5150, Salta, A4408FVY, Argentina

Tel. 011-61575757 –e-mail: fnollas@smn.gob.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta una metodología preliminar para realizar el control de calidad de datos de irradiancia solar global horizontal proveniente de estaciones automáticas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional y otras Instituciones en Argentina. La metodología se basa en la implementación de filtros automáticos en base a diferentes criterios, algunos de los cuales han sido ampliamente estudiados y validados en la literatura científica, mientras que otros han sido desarrollados en base a la detección de problemáticas observadas en las series de datos disponibles. La metodología presentada no asegura aplicabilidad universal a nivel científico dado que muchas de las estaciones no presentan un protocolo de mantenimiento estándar ni calibración frecuente. Sin embargo, y debido a la dificultad de conseguir datos de irradiancia solar medida en superficie, los filtros presentados en esta metodología permiten realizar un diagnóstico preliminar de la calidad de la información obtenida por las estaciones, poniendo a disposición del usuario información de importancia sobre la calidad de las observaciones analizadas para la toma de decisiones en cuanto a su utilización.

Palabras clave: Filtros, Calidad, Estaciones meteorológicas automáticas, Radiación solar.

INTRODUCCIÓN

Las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) se han difundido considerablemente entre los usuarios de información meteorológica debido a la automatización que proporcionan en la adquisición de datos sin la necesidad de la intervención manual del personal, más que un mantenimiento instrumental básico. Las EMAs cuentan con software asociado que permite adaptar la frecuencia de adquisición de la medición a la necesidad del usuario.

La utilización de instrumentación automática donde no se realiza un mantenimiento y calibración adecuada o se realizan pruebas de diagnóstico rutinarias para evaluar el estado de las mediciones, suele generar grandes volúmenes de datos de baja confiabilidad.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuenta con una red de EMAs distribuidas en el país en las cuales se obtienen mediciones de varios parámetros atmosféricos. Sin embargo, la suma de estaciones convencionales y EMAs pertenecientes al SMN no alcanza para cubrir todo el territorio argentino. Es por ello que, paralelamente, el SMN ha desarrollado convenios con distintas instituciones gubernamentales y privadas con la finalidad de recibir y concentrar datos de las EMAs que estos operan en el país. Esta posibilidad de contar con más información y extender el área de cobertura de las mediciones impacta de manera directa en los resultados de los modelos numéricos de pronóstico del tiempo y en la posibilidad de brindar productos de mayor calidad a los usuarios de los distintos servicios sectoriales del país.

Los parámetros meteorológicos para los cuales, típicamente, vienen preparadas las EMAs son: temperatura, humedad relativa, presión, intensidad y dirección del viento y precipitación. Sin embargo, algunas EMAs también incluyen sensores de irradiancia solar global horizontal (GHI) con distintos principios de

funcionamiento. La importancia de medir este parámetro radica en que la energía solar es el principal motor de procesos naturales, así como de distintas aplicaciones para su aprovechamiento utilizadas en diferentes disciplinas. Asimismo, conseguir datos confiables medidos en superficie es realmente un desafío debido a la dificultad que genera adquirir, mantener y calibrar los sensores que los obtienen. En Argentina existen actualmente muy pocas redes de medición de radiación solar (Orte et al., 2021) debido al alto costo y esfuerzo que ello requiere. Esto pone de manifiesto la importancia de los datos de GHI obtenidos por las distintas EMAs distribuidas en el país y sus posibles usos.

Al realizarse mediciones automáticas, puede ocurrir que no se efectúe el mantenimiento adecuado a los sensores y esto representa un inconveniente principalmente al analizar la información de radiación solar, dado que estos datos son los más proclives a incorporar errores (Moradi, 2009). El error en la medición de GHI en superficie se asocia principalmente con las incertezas y errores en los sensores que la miden (Younes et al., 2005), pero además se identifican errores involucrados con la operación de los mismos (Shi et al., 2008; Younes et al., 2005) como pueden ser una mala configuración del datalogger, nivelación incorrecta del sensor, sombras indeseadas o reflexiones causadas por construcciones cercanas, gotas de agua o nieve sobre la cúpula del sensor, entre otras.

Debido a las falsas conclusiones a las que se podría arribar utilizando series de datos con mediciones erróneas, se vuelve imprescindible contar con una metodología de control de calidad (QC) de los datos a través de la implementación de filtros, los cuales deben estar basados en criterios adecuados a este tipo de datos. Debe tenerse en cuenta que, de acuerdo a la frecuencia de adquisición de los datos y la ubicación en la que se encuentre una EMA, se pueden presentar diferentes situaciones que pueden hacer variar los datos de GHI por efectos transitorios como nubosidad (Gueymard, 2017) u otros efectos meteorológicos (Yabra et al., 2021). Por lo tanto, el desarrollo de una metodología unificada para las distintas bases de datos provenientes de EMA con diferentes configuraciones en cuanto a la frecuencia de adquisición y en un país con la extensión y la heterogeneidad de climas y relieves como Argentina es un desafío en sí mismo.

La mayoría de los filtros establecidos en la literatura requieren para su aplicación las tres componentes de radiación solar. Estas son: irradiancia solar directa normal (DNI, por sus siglas en inglés), irradiancia solar difusa horizontal (DHI, por sus siglas en inglés) y GHI.

Uno de los QC más usados actualmente para datos de radiación solar es el de la Baseline Surface Radiation Network (BSRN) (Long y Dutton, 2002; Long y Shi, 2008). El mismo está basado en 4 criterios: valores físicamente posibles, valores extremadamente raros, comparación entre las componentes de radiación (DNI, GHI y DHI) y detector de tracker-off. Cuando se cuenta con las 3 componentes de radiación solar, un control de consistencia puede ser llevado a cabo (Long y Shi, 2008; Journée y Bertrand, 2011; Pashiardis y Kalogirou, 2016; Perez-Astudillo et al., 2018). Este test tiene en cuenta que las tres componentes de la radiación solar se relacionan según la ecuación 1 y por lo tanto establece un valor de aceptación a la diferencia que existe entre la GHI medida directamente contra la estimada utilizando la DNI y DHI.

$$GHI = DNI \cdot \cos(SZA) + DHI \quad (1)$$

donde SZA corresponde al ángulo solar cenital.

Cuando se cuenta con mediciones simultáneas de GHI y DHI, es posible aplicar criterios basados en relaciones K_t -K (Rojas et al., 2018; Younes et al., 2005; Maxwell et al., 1993; Ruiz-Arias et al., 2010; Nollas et al., 2022) donde K_t representa el índice de claridad y K la fracción difusa. Estos parámetros se obtienen según las ecuaciones 2 y 3 donde I_0 representa la irradiancia extraterrestre en un plano horizontal en el tope de la atmósfera corregida por la distancia Tierra-Sol variable.

$$K_t = \frac{GHI}{I_0 \cos(SZA)} \quad (2)$$

$$K = \frac{DHI}{GHI} \quad (3)$$

Algunos autores utilizaron modelos de cielo claro para establecer valores límite (Geuder et al 2015, Geiger et al.2002, Raichijk, 2012; Younes et al., 2005) así como también se han establecido criterios que utilizan la cantidad de horas de sol (heliofanía) para detectar valores sospechosos o erróneos (Moradi, 2009; Journée y Bertrand, 2011).

Entre los trabajos en los que se desarrollaron controles de calidad para analizar específicamente datos registrados con una frecuencia sub-horaria se pueden citar Geuder et al. (2015), Perez-Astudillo et al. (2018) y Journée y Bertrand (2011) así como las metodologías utilizadas por BSRN y propuestas por Long y Shi (2008). Asimismo, debe tenerse cuidado a la hora de trabajar con datos minutales o con menor frecuencia porque a esa resolución temporal se presentan efectos transitorios como aumentos o disminuciones repentinas de la irradiancia solar (Gueymard, 2017). Un punto en común en la mayoría de las metodologías de QC desarrolladas para datos sub-horarios es que requieren conocer dos o más componentes de la radiación solar y son insuficientes para asegurar la calidad de los datos de GHI y DHI en ausencia de la DNI. Asimismo, son muy pocos los trabajos en los que se establecieron filtros para valores GHI capaces de identificar valores erróneos independientemente de algún otro parámetro.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología preliminar y automática de control de calidad de datos de GHI con el objetivo de hacer un análisis inicial de la calidad de la información obtenida por EMAs dentro del país. Cabe aclarar que esta metodología fue desarrollada con la motivación de disponer de una serie de filtros que, al implementarse de manera automática, permitan facilitar el control de calidad de series de datos extensas. Si bien podría reducir la necesidad de realizar análisis visuales en busca de anomalías, siempre es recomendable esta práctica por problemas no contemplados en la presente metodología.

MEDICIONES

Los sensores de radiación solar que poseen las EMAs analizadas en el presente trabajo son variados. Algunas poseen piranómetros termoeléctricos como el Hukseflux SP02 y Kipp y Zonen CMP6, mientras que otras utilizan sensores con principio de funcionamiento fotovoltaico como los de la marca LICOR.

Por otro lado, considerando que muchas de las EMAs pertenecen a redes de terceros, debe tenerse en cuenta que cada institución tiene la potestad de configurar su *datalogger* de la manera que considera adecuada. En el caso particular de las EMAs analizadas en el presente trabajo, los *dataloggers* fueron configurados por las distintas Instituciones para que adquirieran datos con intervalos temporales de 5,10,15,30 y 60 minutos. El intervalo temporal más frecuente en la base de datos de este trabajo fue de 10-min. Si bien es esperable que los valores nocturnos de GHI sean iguales a 0 o incluso menores por el principio de funcionamiento térmico de los piranómetros (Sanchez et al., 2016), debe tenerse en cuenta que las distintas instituciones no presentan el mismo adquisidor de datos, por lo que es posible que en la configuración del *datalogger* se genere un valor de *offset* de manera que, en horas nocturnas, se presenten valores positivos constantes o levemente variables pero con la particularidad de ser pequeños (por debajo de 2 W/m²).

Debido a que el SMN no tiene injerencia sobre las redes de terceros, en algunas circunstancias no se tiene conocimiento sobre el mantenimiento del instrumental o su calibración. Teniendo esto en cuenta, es importante aclarar que los filtros propuestos en el presente trabajo no aseguran una calidad óptima (a nivel científico) de los datos que los pasen, sino que representan un primer análisis de calidad de datos provenientes de sensores de los que se desconoce su mantenimiento. La utilidad de este tipo de datos se deja a criterio de los usuarios para aplicaciones en las que se permita cierto margen de tolerancia en cuanto a las incertidumbres asociadas. Esto implica que los usuarios que hagan uso de esta información deben estar al tanto de las limitaciones que estos datos poseen.

FILTROS APLICABLES A MEDICIONES DE MÁXIMA FRECUENCIA

En esta sección se presentan cuatro filtros que pueden ser aplicados a las mediciones para la máxima frecuencia de adquisición definida de cada sitio de GHI, entendiendo estos como los disponibles para la máxima frecuencia de adquisición definida de cada sitio que puede ser 5-min, 10-min,15-min, etc. Los datos que cumplen con todos los criterios tienen asociado el *flag* 0. Dado que las EMAs obtienen

únicamente valores de GHI, los criterios utilizados para establecer los filtros aplicados en este trabajo consideran únicamente valores de esta variable.

Filtro 1: El objetivo principal de este filtro es establecer los máximos valores esperables en cada sitio de medición. Para ello se proponen diferentes criterios en función de la frecuencia de muestreo, teniendo en cuenta la posibilidad de fenómenos transitorios a medida que la frecuencia de muestreo aumenta. Asimismo, también se hace una diferenciación entre valores sospechosos y valores inválidos, considerando que estos últimos deben directamente ser descartados por el usuario de los datos debido a que su uso seguramente conlleve a resultados poco confiables. Uno de los criterios más utilizados para establecer los valores máximos alcanzables en la medición de GHI está dado por el uso de un modelo que permita obtener estimaciones de irradiancia de cielo claro (GHI_{cs}), condición que asume la ausencia de nubes. En este trabajo se optó por utilizar el modelo de cielo claro detallado en Rigollier et al. (2000), el cual fue utilizado para obtener el Atlas de Radiación Solar de Europa (ESRA). La elección de este modelo empírico se basa en su sencillez, dado que depende de un solo parámetro, la turbidez de Linke establecida para una aeromasa de 2 (TL2), relacionada con la transparencia atmosférica. Si bien varios valores estándar han sido propuestos (Younes et al., 2005; Journé y Bertrand, 2011; Geiger et al., 2002; Ruiz-Arias et al., 2010; Moradi, 2009; Rajchick, 2012), en este trabajo se utilizó un valor fijo de 1.5 para el TL2 para todos los sitios analizados, como se propone en Abal et al. (2017). La ventaja de utilizar un valor fijo radica en la posibilidad de poder utilizar este filtro en tiempo real dado que no se necesitan otros parámetros de entrada procedentes de otras fuentes. Una desventaja es la baja representatividad geográfica y temporal de un valor fijo.

Se establece así que, si una medición de GHI presenta un valor superior a GHI_{cs} para ese mismo momento, el dato se considera “sospechoso” y se marca con el *flag* 1, siendo válido para valores obtenidos con cualquier frecuencia temporal y todas las latitudes.

Por otro lado, para establecer el valor límite a partir del cual una medición debe ser marcada como inválida, la consideración es distinta en función del tiempo de adquisición de los datos. Cuando el tiempo de adquisición es menor o igual a 10 minutos se hace uso de los valores extremadamente raros establecidos en los controles de calidad que aplica la BSRN (Long y Dutton, 2002; Long y Shi, 2008); esto es debido a que se contempla la posibilidad de efectos transitorios como *cloud enhancement events* (CEE). Si una medición de GHI presenta un valor superior a los valores extremadamente raros para ese mismo momento, entonces dicha línea se marca como inválida con el *flag* 2.

Para el caso de tiempos de adquisición mayores a 10 minutos se consideraron inválidos los valores que fueron mayores a la irradiancia solar horizontal extraterrestre promediada para el mismo periodo de adquisición.

Filtro 2: El filtro 2, establecido de manera empírica por Journé y Bertrand (2011), impone que los valores mínimos esperables de GHI en condiciones de cielo muy cubierto en función de SZA y a través del uso del índice de claridad. Si bien el criterio fue introducido para valores 10-min y 30-min, se encontró que es capaz de identificar valores sospechosamente bajos para las frecuencias consideradas en el presente trabajo, lo cual puede ser producto de impurezas sobre el domo de los sensores (naturales o antropogénicas), obstáculos en el horizonte de los sensores, malfuncionamiento del sensor, entre otros. Este filtro tiene la consideración de que, en sitios antárticos, por ejemplo, se presentan condiciones meteorológicas muy cambiantes en donde se pueden presentar muchos días con niebla y a su vez niveles de radiación muy bajos, por lo que para latitudes menores a -60° , este filtro se reduce a que $GHI > 0$ cuando $SZA < 90^\circ$. Los valores que no pasan este filtro se marcan como sospechosos con el *flag* 1.

Filtro 3: El filtro 3 tiene por acción determinar valores que cambien drásticamente y fuera de lo esperado entre registros consecutivos. Fue planteado por Journé y Bertrand (2011) para valores 10-minutales y 30-minutales y se basa en diferencias del índice de claridad en vez de valores absolutos de GHI. Este filtro detecta valores tal que la diferencia entre el índice de claridad para un determinado instante y el siguiente es mayor a 0.75 siempre y cuando SZA sea menor a 88° . Los valores que no cumplen la condición de este filtro se consideran sospechosos y son marcados con el *flag* 1.

Filtro 4: El filtro 4 se enfoca en días en los que se presenta un valor truncado (fijo) a partir de un determinado valor de GHI. Lo más probable es que esto se deba a un error producido durante la configuración del *datalogger*, pero, independientemente del motivo, no deberían considerarse datos provenientes de una base de datos en la cual haya valores truncados. El criterio que se tomó para el desarrollo de este filtro establece que un valor de GHI debe ser, al menos, diferente en un 0.1% respecto al valor anterior cuando $SZA < 90^\circ$. A la hora de utilizar este filtro se deben tener en cuenta dos aspectos importantes: en primer lugar, los decimales con los que se adquieren los valores, ya que si se adquiere el dato sin decimales esto podría provocar que más datos sean filtrados. En segundo lugar, debe tenerse en cuenta la sensibilidad del tipo de instrumento con el que se está trabajando, debido a que si el instrumento no es lo suficientemente sensible entonces variaciones en la irradiancia no serán detectadas por el sensor y esto provocará que esos datos sean filtrados. Los valores detectados por este filtro se consideran sospechosos y son marcados con el *flag* 1.

FILTROS DIARIOS

Se presentan filtros que requieren conocer todos los datos correspondientes a un determinado día, por lo que solo pueden ser aplicados en tiempo diferido (por ejemplo, en forma automática al final del día).

Filtro 5: En este caso no es un filtro en sí mismo, sino un criterio de detección de datos posiblemente erróneos basado en la cantidad de datos que fueron detectados por los filtros aplicados a las mediciones de máxima frecuencia. Este filtro surge de observar varios días en los que se detectó una considerable cantidad de valores sospechosos mediante los filtros 1 a 4 (con uno de ellos o varios combinados). El ejemplo más claro en el que se observó esto fue en datos donde las mediciones son más altas que los obtenidos por el modelo de cielo claro en cierto rango temporal, como se puede ver en la Figura 1.

En ella se puede ver que una porción de los datos medidos queda por debajo del modelo de cielo claro y no son marcados por ninguno de los filtros 1 a 4. Sin embargo, más del 56% de los datos diurnos del día en cuestión, para el sitio considerado, son superiores al modelo de cielo claro y por lo tanto marcados con el *flag* 1. Teniendo la posibilidad de analizar el comportamiento diario de los datos, se concluye que la confiabilidad de los datos no detectados por los filtros 1 a 4 dentro de un día en el que más del 40% de los datos sí fueron detectados por estos filtros es muy baja. Por ello, el filtro 5 establece que todos los datos que se encuentran en un día con más del 40% de los datos diurnos marcados con el *flag* 1 o 2 sean marcados con el *flag* 3, aun los que habían sido inicialmente marcados con el *flag* 1 o 2, de manera tal de que el usuario final decida si los utilizará o no.

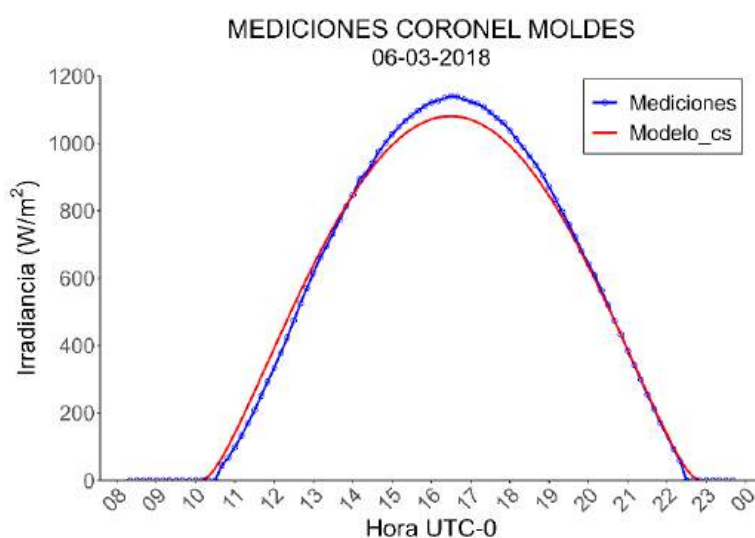


Figura 1. Mediciones obtenidas por la EMA instalada en Coronel Moldes y estimaciones del modelo de cielo claro.

Filtro 6: este filtro establece criterios para marcar con el *flag* 4 todos los valores correspondientes a un determinado día en base a tres parámetros que se pueden obtener una vez finalizado el mismo. Estos parámetros son la desviación estándar de los valores diurnos, la desviación estándar de los valores nocturnos y *offset* nocturno. El filtro 6 se subdivide en tres sub-filtros (6.1, 6.2 y 6.3 en la Tabla 1) de acuerdo al parámetro a utilizar y, como se hace uso de valores diarios, todos los valores de un determinado día se marcan con el *flag* 4 cuando no superan uno o más de estos sub-filtros.

Sub-filtro 6.1: Durante el análisis de los datos se encontraron estaciones que, durante un periodo de tiempo, presentaban valores con muy poca variación diurna, la cual no era esperable para su ubicación geográfica ni época del año. El sub-filtro 6.1 tiene como finalidad identificar los días en los que los valores diurnos de GHI presentan una muy baja variabilidad, lo cual se puede deber principalmente a un valor truncado a partir de cierto valor, valores que cambian muy poco durante el día, mucha suciedad en la cúpula del sensor, entre otras. También puede ocurrir que, por desconfiguración del datalogger, un día determinado haya perdido sus valores diurnos y solo tenga valores nocturnos. Teniendo en cuenta este tipo de situaciones, el sub-filtro 6.1 hace uso de la desviación estándar diaria de los datos diurnos y se establece que los valores del día son inválidos y marcados con el *flag* 4 cuando la desviación estándar es menor a 10 W/m^2 . El sub-filtro 6.1 es aplicable únicamente para sitios en continente, ya que en sitios antárticos se pueden dar días con condiciones meteorológicas donde haya muy poco cambio en GHI debido a niebla o incluso si las fechas están cercanas a la noche polar. Por lo tanto, se debe aplicar para sitios en donde la latitud sea inferior a 60°S , siendo válido para todas las frecuencias de adquisición del dato.

Sub-filtro 6.2: Si bien se puede esperar que sensores termoelectricos presenten leves fluctuaciones en los valores nocturnos de GHI, no es deseable que haya una variación importante en los mismos y menos aún que se presenten valores positivos. Durante el análisis e inspección visual de los datos de GHI se encontraron días en los que la gran variación de los valores nocturnos genera sospechas sobre los valores diurnos, aun cuando los últimos pasaron los filtros anteriores. En la Figura 2 se puede observar el comportamiento de los datos de GHI para la base antártica Carlini en donde se concluye que los datos corresponden, mayormente, a ruido compatible con diversas causas (sensor mal conectado, agua en los bornes del datalogger, empalmes mal hechos, etc.) con la complicación de que, a pesar de ser visiblemente ruido, los valores diurnos se encuentran entre límites posibles por lo que se les asignaría el *flag* 0 si no se realiza algún tipo de control diario. Se encontró que estos tipos de errores tienen asociados valores nocturnos positivos muy variables y altos ($>10 \text{ W/m}^2$).

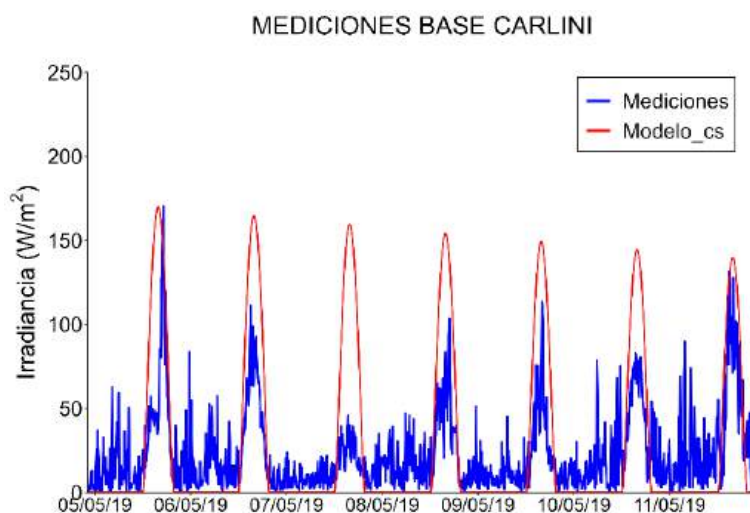


Figura 2. Mediciones obtenidas por la EMA instalada en base Carlini y estimaciones del modelo de cielo claro durante mayo de 2019. Las mediciones nocturnas corresponden a ruido que vuelve sospechosas las mediciones diurnas.

Luego de realizar un análisis de los valores nocturnos de GHI obtenidos por piranómetros termoelectrónicos calibrados y mantenidos, se encontró que los valores nocturnos típicamente mostraban valores de desviación estándar menores a 2 W/m^2 , por lo que este fue el valor que se adoptó como límite para la desviación estándar nocturna obtenido por las EMAs. Por lo tanto, si un determinado día presenta un valor de desviación estándar con valores nocturnos mayor a 2 W/m^2 , todos los valores de ese día son marcados con el *flag* 4. Cabe aclarar que, para obtener la desviación estándar de los valores nocturnos, se utilizaron todos los valores del día antes del amanecer y luego de la puesta de sol tales que $\text{SZA} > 100^\circ$, para evitar posibles efectos atmosféricos que incrementen los valores de GHI. El subfiltro 6.2 es aplicable para todo sitio independientemente de la latitud y del tiempo de adquisición de los datos.

Sub-filtro 6.3: Como ya se ha mencionado anteriormente, las instituciones no tienen todas el mismo tipo de datalogger, y cada una tiene la potestad para configurarlo como lo considere más conveniente; por ello es posible que, debido a diferencias en la electrónica y/o en la configuración del *datalogger*, además del comportamiento mismo del sensor, se pueda generar un valor de *offset* tanto negativo como positivo. Este *offset* se puede obtener de manera sencilla durante las horas nocturnas, debido a la ausencia de radiación solar, como un promedio de los valores de GHI tales que $\text{SZA} > 100^\circ$. Como se explicó en el subfiltro 6.2, el comportamiento de los valores nocturnos es un buen parámetro para poder detectar valores diurnos sospechosos. Es por esto que el subfiltro 6.3 se centra en los valores de *offset* nocturno con la finalidad de determinar un rango de aceptabilidad para este parámetro a través de la implementación de valores límite tanto superiores como inferiores. En la Figura 3 se pueden observar mediciones con un *offset* nocturno tan alto que, automáticamente, invalida las mediciones diurnas a pesar de que las mismas se encuentran dentro de valores adecuados, aunque sin ninguna apariencia de comportamiento típico de esta medida.

Para obtener el valor inferior se utiliza el enfoque propuesto por Long y Dutton (2002) y Long y Shi (2008), quienes establecieron que los valores nocturnos físicamente posibles pueden alcanzar valores de hasta -4 W/m^2 . Por otro lado, a través de la comparación con modelo de cielo claro, se encontraron sitios con datos de GHI con un *offset* nocturno positivo, pero con valores diurnos en su mayor parte dentro de rangos esperables. En este trabajo se encontró que un valor de *offset* nocturno de hasta 2 W/m^2 sigue siendo adecuado teniendo en cuenta las diferencias en la tecnología de los dataloggers, su configuración y su calibración. Este subfiltro 6.3 es igualmente aplicable para todo sitio independientemente de la latitud y del tiempo de adquisición de los datos.

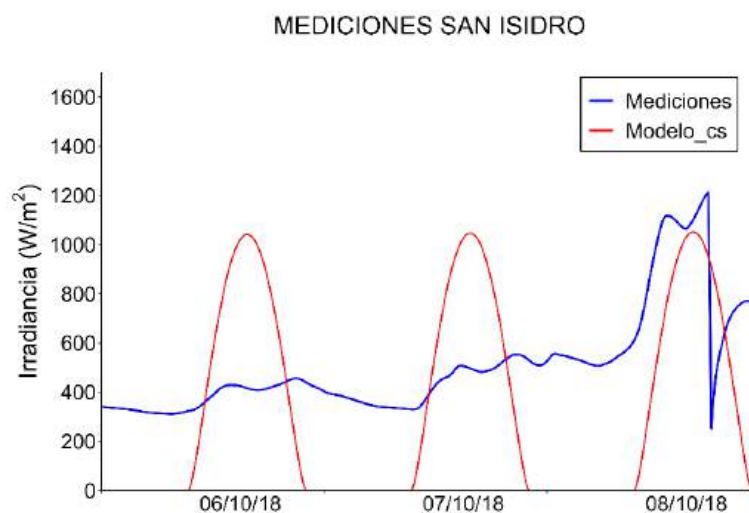


Figura 3. Mediciones obtenidas por la EMA instalada en San Isidro y estimaciones del modelo de cielo claro durante octubre de 2018. Las mediciones nocturnas presentan valores que vuelve sospechosas las mediciones diurnas.

Filtro 7: Así como trabajar con datos sospechosos de ser erróneos puede conducir a conclusiones erróneas, trabajar con datos incompletos también puede ser un problema a la hora del análisis. Por ello, el filtro 7 se

implementa en la presente metodología con la finalidad de detectar días que no cuenten con, al menos, el 80% de los datos diurnos. Para ello, en este filtro se calcula la cantidad teórica de datos diurnos que debería tener cada día en cada sitio en función de sus coordenadas, fecha y la frecuencia de muestreo. Este valor se compara con la cantidad de datos diurnos disponibles con el criterio de que si la cantidad de datos diurnos disponible es menor al 80% de los teóricos entonces todos los valores de dicho día se marcan con el *flag* 5.

FILTRO MENSUAL

Filtro 8: Cuando se dispone de todos los valores de GHI correspondientes a un determinado mes luego de haber aplicado los filtros 1 al 7, es posible identificar días que, si bien superaron dichos filtros, deben ser marcados como sospechosos por estar rodeados de días que presentaron los *flags* diarios 6 y 7. Ejemplos de este tipo de comportamiento se pueden ver en las Figura 4. En esta figura se puede ver que los valores de GHI para el sitio en cuestión presentan valores muy altos, por encima incluso de la irradiancia extraterrestre, por lo que casi todos los días fueron marcados con el *flag* 5. El análisis se centra en los días 23-12 y 28-12 dado que, por la presencia de nubes, la mayor parte del día presenta valores de GHI que pasan los filtros 1 a 7. El hecho de que tantos días de un determinado mes hayan presentado un comportamiento que los invalida conlleva que esos días, donde el comportamiento parece adecuado, sea considerado también sospechoso. Es por esto que el filtro 8 de la presente metodología establece que si 10 o más días de un determinado mes han sido marcados con los *flags* 3 y/o 4 entonces los días de ese mes que no presenten esos *flags* quedarán marcados con el *flag* 6 y el usuario de los datos debe decidir si considerará esos datos en su análisis o no.

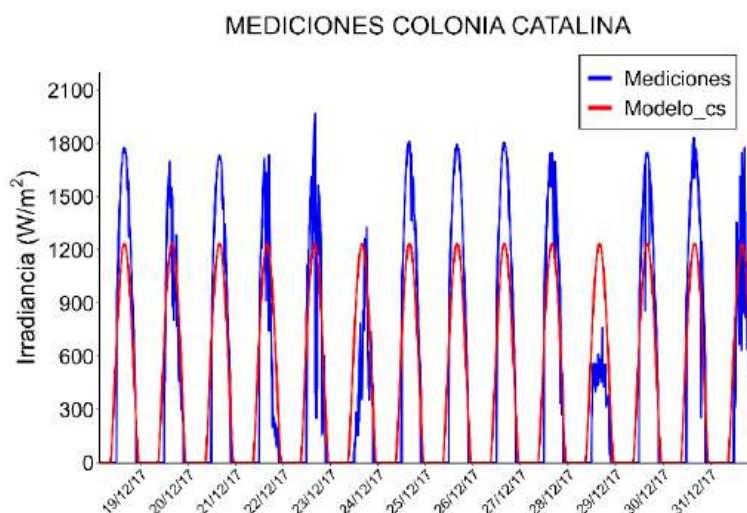


Figura 4. Mediciones en las que se observan que la mayor parte de las mismas se encuentran por encima del modelo de cielo claro en días despejados a excepción de días con marcada nubosidad.

Un resumen de todos los filtros presentados en la presente metodología, su correspondiente *flag* (también conocido como bandera o indicador), latitudes y frecuencia temporal en las que se aplican se muestra en la Tabla 1. Los datos que cumplen con todos los criterios tienen asociado el *flag* 0.

JERARQUÍA DE LOS FILTROS

La metodología de QC implementada en este trabajo presenta 7 *flags*, de acuerdo al tipo de filtro utilizado. Los *flags* van desde 0 hasta 6, donde el *flag* 0 se reserva para todos los datos que pasaron los filtros. El hecho de plantear diferentes *flags* de acuerdo al tipo de filtro utilizado permite establecer una jerarquía entre los mismos, teniendo en cuenta la severidad o capacidad de detección de cada filtro, así como la invalidez de datos que cada uno de ellos presenta. Debe tenerse presente que el orden en el que los filtros se presentan, del 1 al 8, responde a la periodicidad con la que se pueden aplicar teniendo en cuenta que hay algunos que pueden aplicarse en tiempo real, otros a día vencido y otros a mes vencido. A pesar de esto, la

severidad asociada a cada uno de los flags no sigue el mismo orden que los filtros. En este trabajo se consideró que los *flags* 3 y 4 tienen la mayor jerarquía debido a que los mismos se asocian con filtros diarios, que son capaces de identificar comportamientos anómalos considerando la variabilidad diurna y nocturna. Por otro lado, los *flags* 2 y 1 siguen en el orden descendiente, respectivamente, debido a que están asociados con valores que no superan alguno de los criterios instantáneos por lo que se consideran inválidos, en el caso del *flag* 2, o sospechosos en el caso del *flag* 1. Luego continúa el *flag* 6, el cual establece la sospecha sobre los valores de todo un día, pero analizando el comportamiento de todo el mes, por lo que el criterio aplicado en el mismo es indirecto. Por último, el *flag* 5 es el que menor jerarquía o severidad presenta teniendo en cuenta que no representa un criterio para detectar datos sospechosos de ser erróneos, sino que marca los datos de acuerdo a la cantidad de datos diurnos disponibles, independientemente de su calidad.

Tabla 1. Descripción de criterios para cada filtro, flag asociado, latitud para la que se aplica y tiempo de adquisición del dato para el cual se aplica. S representa la corrección en la distancia Sol-Tierra y E_{cs} la constante solar establecida en 1361.1 W/m^2 (Gueymard, 2018).

Filtro	Criterio	Flag asociado	Latitud de aplicación	Tiempo de adquisición	Dato al que se aplica
1	$GHI > GHI_{cs}$	1	Todas	Todos	De máxima frecuencia
	$GHI > 1.2 * S * E_{sc} * (\cos(SZA))^{1.2} + 50 \text{ W/m}^2$	2	Todas	$\leq 10 \text{ min}$	De máxima frecuencia
	$GHI > S * E_{sc} * \cos(SZA)$	2	Todas	$> 10 \text{ min}$	De máxima frecuencia
2	$K_t < (80 - SZA) * 10^{-4}$ si $SZA \leq 80^\circ$, $GHI \leq 0$ y $SZA > 80^\circ$	1	Latitud $< 60^\circ S$	Todos	De máxima frecuencia
3	$ K_t(t) - K_t(t-1) > 0.75$ si $SZA < 88^\circ$	1	Todas	Todos	De máxima frecuencia
4	$(GHI(t) - GHI(t-1)) / GHI(t-1) < \pm 0.1\%$	1	Latitud $< 60^\circ S$	Todos	De máxima frecuencia
5	40% del día con el flag 1 o 2	3	Todas	Todos	Análisis diario
6.1	desviación estándar diurna de $GHI < 10 \text{ W/m}^2$	4	Latitud $< 60^\circ S$	Todos	Análisis diario
6.2	desviación estándar nocturna de $GHI > 2 \text{ W/m}^2$	4	Todas	Todos	Análisis diario
6.3	$offset \text{ nocturno} < -4 \text{ W/m}^2$	4	Todas	Todos	Análisis diario
	$offset \text{ nocturno} > 2 \text{ W/m}^2$				
7	Cantidad de datos diurnos $< 80\%$ de cantidad teórica de datos diurnos	5	Todas	Todos	Análisis diario
8	Más de 10 días del mes marcados con el <i>flag</i> 3 o 4	6	Todas	Todos	Análisis mensual

RESULTADOS

Para analizar una metodología de QC debe tenerse en cuenta que no es correcta la idea de que mientras más datos marque como sospechosos entonces más eficiente es y, por lo tanto, mejor que otra. Debe haber un equilibrio entre la rigurosidad y flexibilidad de los filtros en base a criterios relacionados con la GHI para evitar filtrar datos correctamente medidos de datos que deben, al menos, marcarse como sospechosos. Por lo tanto, expresar los resultados de esta metodología en base a la cantidad de datos que son detectados y filtrados por cada sitio no se considera la mejor manera de demostrar su utilidad ni eficiencia a la hora de determinar calidad. Esto es debido a que cada sitio de medición tiene sus características y, durante el análisis, se encontraron sitios cuyos valores fueron filtrados en un 10% y sitios con un gran nivel de abandono cuyos datos fueron marcados por la metodología en un 100%. El resultado puede evaluarse mejor observando los datos que pasaron todos los filtros, en los cuales no se observaron valores incorrectos. De

cualquier manera, y a modo de referencia, esta metodología se aplicó a datos confiables obtenidos por el SMN en la ciudad de Buenos Aires durante el año 2018. Para que los datos sean comparables con los obtenidos por las EMAs, los datos minutales fueron promediados para obtener un dato cada 10 minutos. Luego de realizar el promedio se obtuvo un total de 52417 datos 10-min considerando datos diurnos y nocturnos, de los cuales 2344 fueron marcados con algún flag. Luego del análisis realizado a estos datos, se puede ver que solo hubo valores detectados en los filtros 1 a 6.1 con una mayor cantidad de valores detectados por el filtro 1 y, en sintonía con los criterios de esta metodología, en segundo lugar, se encuentra el filtro 5. A su vez, la cantidad de valores detectados por el filtro 6.1 muestra que un día entero posee una desviación estándar muy baja. Por otro lado, también se obtuvo que, luego de aplicada la metodología a los datos de Buenos Aires, el resultado fue que 1277 valores se marcaron con el flag 1 mientras que 576 fueron marcados, de manera independiente, con el flag 3. Finalmente, la misma cantidad de valores detectados por el filtro 6.1 fue, también, marcada con el flag 4.

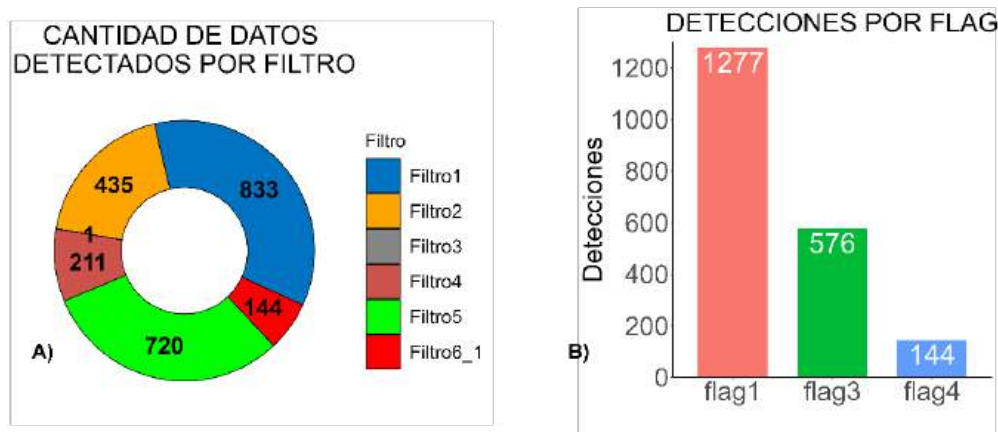


Figura 5. A) Cantidad de valores detectados por cada filtro al aplicar la metodología de QC a datos medidos en Buenos Aires durante el 2018. B) Cantidad de valores asociados con los flags luego de aplicada la jerarquía de los mismos.

El análisis realizado con datos confiables obtenidos en Buenos Aires no es representativo de lo que debería obtenerse en otros sitios y debe aclararse que el porcentaje de datos detectados por los filtros en este sitio no representa un valor mínimo que deba esperarse en general.

CONCLUSIONES Y MEJORAS

Se presenta una metodología de QC novedosa para el filtrado de datos de irradiancia solar global obtenidos con estaciones meteorológicas automáticas. Esta metodología se desarrolló en base a los datos disponibles obtenidos, tanto por redes del SMN como de otras instituciones, y contempla posibles efectos transitorios y geográficos, implementación automática y la posibilidad de realizar los controles en tiempo real y/o diferido. Esto último es una de las principales ventajas ya que el análisis en base a valores diarios o mensuales permite identificar problemas que no se evidencian al trabajar con los datos adquiridos con una determinada frecuencia (5-min a 60-min). Más allá de las bondades de la metodología presentada en este trabajo, deben tenerse en cuenta que no es capaz de detectar algunos problemas conocidos asociados a los datos de GHI. Un ejemplo de esto es la desnivelación que se puede producir en los sensores y que requiere la intervención de una persona para asegurar el mantenimiento continuo. Esta metodología tampoco detecta si un sensor determinado está obteniendo valores de GHI menores a los esperables debido a la tierra o polvo que pueda tener la cúpula externa de un sensor o incluso debido a un factor de calibración inadecuado que genere la obtención de valores levemente inferiores al modelo de cielo claro. Debido a la dificultad que conlleva detectar disminuciones sistemáticas para un determinado SZA, la metodología tampoco es capaz de detectar posibles bloqueos de la radiación solar que produzcan sombras sistemáticas sobre los sensores. Una de las limitaciones se encuentra en el filtro 1 debido a que el uso de un valor fijo de TL2 en el modelo de cielo claro puede no ser aplicable a todas las escalas temporales, especialmente las más pequeñas, o tener

espacio para ser más ajustado dependiendo del sitio o época del año. Una mejora que se podría implementar sería la utilización de algún modelo más complejo que presente un mejor desempeño, lo cual se consigue utilizando mayor cantidad de parámetros de entrada.

Otro aspecto que podría incluirse en busca de una mejora en la metodología sería la inclusión de incertidumbres en las mediciones, aunque esto se torna muy complicado cuando no se conoce ni siquiera el régimen de calibraciones de varios de los sensores ni tampoco la incertidumbre en sus respectivas constantes de calibración

REFERENCIAS

- Abal, G., Aicardi, D., Alonso-Suárez, R., Laguarda, A., 2017. Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. *Solar Energy*, 141, 166-181. doi: 10.1016/j.solener.2016.11.030
- Geiger, M., Diabaté, L., Ménard, L., y Wald, L. 2002. A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. *Solar Energy*, 73(6), 475-480. doi:10.1016/s0038-092x(02)00121-4
- Geuder, N., Wolfertstetter, F., Wilbert, S., Schüler, D., Affolter, R., Kraas, B., ... Espinar, B. 2015. Screening and Flagging of Solar Irradiation and Ancillary Meteorological Data. *Energy Procedia*, 69, 1989-1998. doi:10.1016/j.egypro.2015.03.205
- Gueymard, C. A. 2017. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. *Solar Energy*, 153, 755-765. doi:10.1016/j.solener.2017.05.004
- Gueymard, C. A. 2018. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy*, 168, 2-9. doi:10.1016/j.solener.2018.04.001
- Journée, M., y Bertrand, C. 2011. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. *Solar Energy*, 85(1), 72-86. doi:10.1016/j.solener.2010.10.021
- Long, C.N., Dutton, E.G., 2002. BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. Available online at https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf (último acceso 08/08/2023).
- Long, C.N., Shi, Y., 2008. An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *Open Atmos. Sci. J.* 2, 23-27. <http://dx.doi.org/10.2174/1874282300802010023>
- Maxwell, E., Wilcox, S., y Rymes, M. 1993. Users manual for seri qc software, assessing the quality of solar radiation data. Solar Energy Research Institute, Golden, CO. Available online at <<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/5608.pdf>> (último acceso 08/08/2023).
- Moradi, I. 2009. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy*, 34(1), 1-6. doi:10.1016/j.energy.2008.09.006
- Nollas, F. M., Salazar, G. A., y Gueymard, C. A. (2022). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.056>
- Orte, F., Wolfram, E., Luccini, E., D'Elia, R., Lusi, A., Pallotta, J., y otros (2021). Saver-Net UV-total solar irradiance monitoring network in Argentina. *Revista Meteorológica, Argentina*, 47(2), 150002-10. doi: 10.24215/1850468Xe016. Disponible en: <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/15292>
- Pashiardis, S.; Kalogirou, S.A. 2016. Quality control of solar shortwave and terrestrial longwave radiation for surface radiation measurements at two sites in Cyprus. *Renewable Energy*, 96(), 1015-1033. doi:10.1016/j.renene.2016.04.001
- Perez-Astudillo, D., Bachour, D., y Martin-Pomares, L. 2018. Improved quality control protocols on solar radiation measurements. *Solar Energy*, 169, 425-433. doi:10.1016/j.solener.2018.05.028
- Raichijk, C. (2012). Control de calidad de mediciones de radiación solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 16, 17-22. ISSN 0329-5184
- Rigollier, C., Bauer, O., y Wald, L. 2000. On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, 68(1), 33-48. doi:10.1016/s0038-092x(99)00055-9
- Rojas, R. G., Alvarado, N., Boland, J., Escobar, R., y Castillejo-Cuberos, A. 2018. Diffuse fraction estimation using the BRL model and relationship of predictors under Chilean, Costa Rican and Australian climatic conditions. *Renewable Energy*. doi:10.1016/j.renene.2018.09.079

- Ruiz-Arias, J. A., Alsamamra, H., Tovar-Pescador, J., y Pozo-Vázquez, D. 2010. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 881–893. doi:10.1016/j.enconman.2009.11.024
- Sanchez, G., M. L. Cancillo, and A. Serrano 2016, An intercomparison of the thermal offset for different pyranometers, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 7901–7912, doi:10.1002/2016JD024815.
- Shi G. Y., Hayasaka T, Ohmura A, Chen ZH, Wang B, Zha JQ, y otros. 2008 Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. *J Appl Meteorol Climatol* 2008;47:1006e16.
- Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, R. Vasques Ferro, C. Ribero, L. Chiaparrí, E. Fernández, C. Campetella, O. Bonfili, M. Ceballos, G. Barrera, N. Troche, V. López, M. Schizzano, N. Bentancor, L. Berengua y M. Steven, 2021: Las nieblas en los aeropuertos argentinos: revisión de literatura y perspectiva de los pronosticadores. *Nota Técnica SMN 2021-89*
- Younes, S., Claywell, R., y Muneer, T. 2005. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. *Energy*, 30(9), 1533–1549. doi:10.1016/j.energy.2004.04.031

QUALITY CONTROL OF GLOBAL SOLAR RADIATION DATA OBTAINED BY AUTOMATIC WEATHER STATIONS

ABSTRACT: In this work, a preliminary methodology is presented to perform a quality control of horizontal global solar irradiance data from automatic stations operated by both the National Meteorological Service and other Institutions in Argentina. The methodology is based on the implementation of filters that have different criteria, some of which have been widely studied and validated in the scientific literature, while others have been developed based on the detection of different problems observed in the available data series. The methodology presented is preliminary and does not ensure universal applicability at a scientific level, since many of the stations do not have a standard maintenance protocol or frequent calibration. However, and due to the difficulty of obtaining solar irradiance data measured on the surface, the filters presented in this methodology allow a preliminary diagnosis of the quality of the information obtained by the stations, making important information available to the user about the quality of the databases analyzed for decision-making regarding their use.

KEYWORDS: filters, quality, automatic weather stations, solar radiation.

MODELOS DE MACHINE LEARNING PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR EN PLANO HORIZONTAL UTILIZANDO INFORMACIÓN SATELITAL MULTIESCALA

Paula Iturbide¹, Ximena Orsi¹, María José Denegri^{1,2}, Santiago Fioretti¹, Pablo Ruiz¹, Sergio Luza¹, Valeria Stern¹, Rodrigo Alonso-Suárez³, Franco Ronchetti^{4,5}

¹Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES). Univ. Nacional de Luján, CP 6700, Buenos Aires, Argentina.

²Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, Argentina.

³Laboratorio de Energía Solar, Dpto. de Física del CENUR Litoral Norte, Udelar, Uruguay.

⁴Instituto de Investigación en Informática LIDI, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.

⁵Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CICPBA), Buenos Aires, Argentina.

e-mail: paula.itur@gmail.com

RESUMEN: La falta de precisión en los datos de radiación solar puede tener un gran impacto en la rentabilidad de los proyectos de energía solar. Las redes de medición terrestre ofrecen información limitada por su distribución esparza en el territorio. Esto lleva a desarrollar modelos de estimación por imágenes satelitales, los cuales resuelven la espacialidad si son ajustados a mediciones terrestres de calidad. En este estudio, se desarrollan y validan modelos empíricos de aprendizaje automático para la estimación por satélite de radiación solar global horizontal, demostrando su utilidad y precisión en la región analizada. Estos modelos se alimentan con variables provenientes de imágenes satelitales GOES-16 y variables geométricas. Los resultados sugieren que para ciertas combinaciones de variables satelitales de entrada, la información geométrica puede ser utilizada en forma implícita para realizar estimaciones precisas de la radiación solar. Debido al volumen de la información satelital disponible, desarrollamos un análisis de componentes principales para reducir la dimensionalidad. Para comparar el modelo propuesto adaptamos localmente las estimaciones del Heliosat-4 y del CIM-ESRA al sitio, y también implementamos el modelo CIM-McClear. Los resultados muestran una superioridad de desempeño del modelo de aprendizaje automático propuesto, demostrando que es capaz de extraer información de la multiescala espacial satelital. Por otro lado, la mejora de desempeño obtenida es leve, lo que muestra la dificultad en seguir mejorando el desempeño de la estimación satelital de radiación solar.

Palabras clave: Radiación solar, aprendizaje automático, Imágenes satelitales. GOES16, GHI.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la estimación de radiación solar por satélite coexisten tres enfoques: el físico, el estadístico y el híbrido. Los modelos físicos resuelven las ecuaciones de transferencia radiante en la atmósfera, utilizando información sobre los componentes atmosféricos que interactúan con la radiación solar (Perez R. et al., 2013). Los modelos estadísticos se basan en una serie de coeficientes ajustados empíricamente a datos terrestres tomando como entrada la información satelital. Por último, en los modelos híbridos o semi-empíricos la formulación del modelo tiene una base física, pero dependen de una serie de parámetros ajustables.

En la región de la Pampa Húmeda se han desarrollado modelos satelitales híbridos específicamente ajustados, como el CIM-ESRA y CIM-McClear (Laguarda et al., 2020). Otro modelo relevante en la

región es el modelo físico Heliosat-4 (Qu et al., 2017), que ha sido extensamente evaluado (Gonzalez et al., 2019; Laguarda et al., 2020, 2021; Sarazola et al., 2023). Los modelos CIMs, al utilizar imágenes GOES16 y estar ajustados localmente a la región, han sido evaluados con significativo mejor desempeño en la Pampa Húmeda que el Heliosat-4, que utiliza imágenes del satélite europeo Meteosat, obteniendo desvíos cuadráticos medios entre 16-17% (relativo a la media de las medidas) para estimaciones de irradiancia solar global horizontal (GHI) a escala 10-minutal. Reducir la incertidumbre por debajo de este límite ha demostrado ser un desafío.

Una posible forma de reducir esta incertidumbre es a través del uso de información satelital multi-escala espacial y algoritmos de aprendizaje automático como redes neuronales artificiales (RN), k vecinos más cercanos (kNN), vectores soporte de regresión (SVR), máquinas de aprendizaje extremas (ELM) y ensambles de árboles como random forest (RF) y gradient boosting (GB). En la actualidad es común en varias áreas el uso de estos algoritmos. En particular, para la estimación de la radiación solar se han utilizado principalmente con base en mediciones terrestres de otras variables meteorológicas como presión, temperatura de aire ambiente, heliofanía, humedad, precipitación, nubosidad vista desde tierra, velocidad del viento y/o evaporación, etc., y variables auxiliares como el día del año, latitud, longitud, altitud, modelos de cielo claro, y/o variables geométricas, entre otras (Raichijk, 2008; Sayago et al., 2011; Jiménez et al., 2017; Olivera et al., 2020). Las investigaciones que emplean estas técnicas con información satelital de nubosidad son escasas (Verbois et al., 2023).

Este trabajo es la continuación del artículo de Iturbide et al. (2023), donde se implementaron los algoritmos RN, RF y regresión lineal simple para la estimación de la GHI por satélite. Se utilizaron 38 variables de entrada de las cuales 19 estaban relacionadas con el factor de reflectancia y 19 con la reflectancia planetaria. Estas variables abarcaban diversas resoluciones espaciales, variando entre 0,01 y 0,9 grados de latitud y longitud. Además, se incluyeron el coseno del ángulo cenital y el modelo de cielo claro McClear como parte de las variables de entrada. Los resultados de dicho artículo mostraron un rendimiento superior por parte de la RN, seguida por el enfoque de RF, incluso después de la eliminación de variables como el modelo de cielo claro y el coseno del ángulo cenital. En contraste, la regresión lineal simple demostró un desempeño insuficiente al excluir estas variables, ya que carecía de la capacidad para reconstruir la referencia temporal esencial para la estimación de la GHI. Cabe mencionar que la comparación con modelos preexistentes en Iturbide et al. (2023) se llevó a cabo sin realizar la adaptación al sitio.

El objetivo de este artículo es mejorar el desempeño de los modelos de aprendizaje automático mediante la incorporación de variables de entrada previamente no consideradas, tales como el índice de nubosidad y un cálculo mejorado de la reflectancia planetaria. Además, se introduce un análisis de componentes principales que contribuye a reducir la dimensionalidad del conjunto de entrada, mejorando la eficacia de los modelos y condensando la información satelital en un conjunto reducido de variables. También se agrega el modelo GB para comparar su desempeño. Se procede a comparar el modelo resultante con los disponibles para la región, adaptados al sitio, y se incluye la implementación con ajuste local a medidas del modelo CIM-McCclear. Para ello, se usa el mismo esquema de ajuste y testeo que el utilizado para los modelos de aprendizaje automático, de modo de realizar una comparativa justa.

METODOLOGÍA

Medidas en tierra y pre procesamiento de datos

En este estudio se utilizaron datos de la estación Luján (de la red GERSolar) correspondientes al periodo 2019-2021, adquiridos con piranómetro de la firma Kipp & Zonen modelo CMP21 - equipo de Clase A según la norma de clasificación de equipamiento para la medida de radiación solar (ISO 9060:2018)-, y un adquisidor de datos Campbell Scientific modelo CR1000. Se adoptó la escala temporal de 10 minutos, que es la cadencia temporal de las imágenes capturadas por el satélite GOES-16. Las integrales 10 minutas (en W/m^2) fueron sometidas a un algoritmo de control de calidad que consta de los cuatro filtros secuenciales mostrados en la Tabla 1, seguido de una revisión visual de las series para descartar períodos afectados por sombras u otros fallos. En Iturbide et al. (2023) se detalla lo que impone cada

filtro. En la Tabla 2 se muestran los resultados del filtrado para la estación Luján, donde se indica además su ubicación precisa.

Tabla 1: Filtros aplicados a las medidas en tierra

Filtro	Criterio	Descripción
1	$\alpha_s > 7^\circ$	Mínima altura solar
2	$-2W/m^2 < I_h < I_0 \cdot 1,2 \cdot \cos\theta_z^{1,2} + 50W/m^2$	Cotas de la BSRN (Long y Shi, 2008)
3	$0W/m^2 < I_h < I_h^{ESRA} (TL = 1,8)$	Cotas de un modelo de cielo claro
4	$k_{tp} < 0,89$	Cota del índice de claridad de Pérez

Tabla 2: Ubicación de la estación de medida y sus equipos de medición. Los N totales (luego de los filtros) corresponden a medidas integradas 10-minutales y el periodo corresponde a 2019-2021

Estación	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Equipo	N Total
Luján, ARG	-34,558	-59,062	CMP21	62.592

Información satelital

Se utilizan las imágenes del canal visible (C02, centrado en 0,64 μm) del satélite meteorológico geostacionario GOES-16. Este satélite forma parte de la red de satélites geostacionarios para la observación de la Tierra que cubre todo el globo terráqueo y es administrado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos. Desde el año 2018 este satélite genera imágenes para todo el continente americano con una cadencia temporal regular de entre 10 y 15 minutos. Se encuentra ubicado sobre el ecuador terrestre en la longitud -75°W . Su resolución espacial es variable a lo largo de la imagen, siendo de 500 m en su nadir. Sobre la región de la Pampa Húmeda el tamaño del píxel varía entre 1 y 3 km. El canal visible es el adecuado para la estimación de radiación solar debido a que la nubosidad diurna es claramente reconocible y cuantificable. Las nubes son típicamente más reflectivas que el fondo (la superficie terrestre), y por tanto, distinguibles.

Las dos variables típicas que se calculan a partir del canal visible de una imagen satelital son el factor de reflectancia (FR) y la reflectancia planetaria (RP). Esta última cantidad es también conocida como Albedo terrestre. El FR es una normalización de la radiancia medida por el satélite proveniente de cada píxel respecto al máximo que es capaz de medir (es decir, la radiación solar que incide sobre el tope de la atmósfera normalizada por la respuesta espectral del radiómetro en órbita). Se encuentra por tanto en el intervalo $[0, 1]$ y contiene, además de información sobre nubosidad, información espacial sobre la iluminación variable del Sol sobre la Tierra. La cantidad RP contiene la normalización necesaria para eliminar esta dependencia espacial y es efectivamente la reflectividad de la Tierra, en su sentido físico estricto. Esta normalización se obtiene dividiendo a FR por el coseno del ángulo cenital solar.

La reflectancia planetaria es también normalizada para obtener el índice de nubosidad N de la siguiente manera:

$$N = (R - R_0)/(R_{max} - R_0) \quad (1)$$

donde R_0 es la reflectancia planetaria de fondo asociado a condiciones de cielo claro para cada celda y el parámetro R_{max} se asocia a condiciones de nubosidad total. Se utiliza aquí un modelo de fondo para el cálculo de R_0 específicamente ajustado al píxel objetivo (Alonso-Suárez et al., 2011) y un valor fijo de 0,8 para R_{max} , que fue optimizado para la estimación de GHI en la región (Laguarda et al., 2018).

Estas variables permiten caracterizar la nubosidad a partir de las imágenes satelitales y son las que se usan para estimar la radiación solar en toda condición de cielo.

Modelos estadísticos con aprendizaje automático

Definición de los conjuntos de entrenamiento y testeo. El propósito principal es que los algoritmos adquieran la capacidad de estimar la GHI mediante el ajuste a mediciones terrestres. Dado el carácter estacional anual de la GHI, se empleó un conjunto de datos abarcando dos de los tres años disponibles para el entrenamiento, mientras que el tercer año se reservó para el testeo. Se aplicaron todas las posibles combinaciones de años para evitar tres posibles sesgos. En primer lugar, se evitó un sesgo relacionado con la distribución aleatoria de los datos en los conjuntos de entrenamiento y testeo, ya que los datos de momentos consecutivos podrían presentar similitudes. En segundo lugar, se mitigó un sesgo vinculado a las particularidades de cada año, pues un año podría diferir significativamente de otro en términos de radiación solar. En tercer lugar, se abordó un sesgo relacionado con los datos faltantes: el año 2020 registró un hueco de dos meses, y para los años 2019 y 2021 se carece de información correspondiente al mes de diciembre.

VARIABLES DE ENTRADA. Las variables de entrada utilizadas en los modelos de aprendizaje automático son el coseno del ángulo cenital ($\cos z$), el factor de reflectancia (FR), la reflectancia planetaria y el índice de nubosidad. Se trabaja con dos índices de nubosidad N1 y N2 y dos factores de reflectancia R y RC. Las variables $\cos z$, FR y R son las mismas que se utilizaron en el artículo de Iturbide et al. (2023). La distinción entre las reflectancias planetarias (R y RC), radica en la manera en que son normalizadas. Para la normalización de RC se utiliza la expresión de la masa de aire de Young (1994), lo que produce mejores resultados al inicio y final del día que la normalización simple por coseno del ángulo cenital, utilizada para R. La diferencia entre N1 y N2 está en el modelo de brillo de fondo utilizado. El valor de N1 fue calculado con el modelo de fondo original de Alonso-Suárez et al. (2011) utilizado desde la generación vieja de satélites GOES. En cambio, el N2 se calculó con un modelo de fondo actualizado y ajustado al satélite GOES16. Algunas pruebas empíricas sugieren que este último presenta mejoras en comparación con el primero.

Las variables satelitales FR, R, RC, N1 y N2 se consideran a distintas escalas espaciales con nomenclatura del 01 al 20: FR01-FR20, R01-R20, RC01-RC20, N1_01-N1_20, N2_01-N2_20, siendo promedios espaciales en celdas cuadradas de dimensiones crecientes. El espaciado entre tamaños no sigue una relación lineal; en los tamaños más pequeños, el espaciado es más detallado, y viceversa para los tamaños mayores.

Modelos de aprendizaje supervisado. En continuación al estudio previo, se amplió el conjunto de modelos de aprendizaje automático supervisado. Además de la regresión lineal, RN (100 neuronas ocultas y función de activación ReLu) y el RF (30 estimadores) que fueron abordados en el trabajo anterior, se incorpora ahora el modelo de GB. Este nuevo modelo busca enriquecer el análisis al ofrecer una perspectiva adicional en la estimación de la radiación solar.

RESULTADOS

Ajuste local de los modelos CIM-ESRA y CAMS

Se descargaron los estimativos de GHI de los modelos satelitales CIM-ESRA y Heliosat-4 para el periodo 2019-2021 para la estación Luján de cada sitio web <http://les.edu.uy/online/stack-loc/> (CIM-ESRA, portal LES) y <https://www.soda-pro.com/web-services> (Heliosat-4, portal CAMS). Los estimativos de CIM-ESRA están disponibles en una escala 10-minutal para diferentes estaciones latinoamericanas una de las cuales corresponde a Luján, Argentina. Los estimativos de CAMS no están disponibles en la resolución temporal 10-minutal trabajada en este artículo, por lo que se descargaron datos minutales y luego se integraron a la escala 10-minutal. Estos modelos se utilizaron para comparar

sus indicadores de desempeño respecto a las medidas en tierra con los de los modelos estadísticos desarrollados en este trabajo.

La adaptación local de los modelos CIM-ESRA y CAMS fue ejecutada mediante cuatro enfoques distintos (Salazar et al., 2021). Las tres primeras estrategias involucraron diversas combinaciones de ajustes mediante regresión lineal simple, mientras que la cuarta opción se basó en un enfoque de mapeo cuantílico. La disparidad entre las metodologías lineales y el mapeo cuantílico radica en su enfoque para abordar el sesgo promedio de las estimaciones. Las estrategias lineales buscan mitigar el sesgo promedio ajustando una regresión de primer orden que relaciona las estimaciones con las mediciones reales. En contraste, el enfoque del mapeo cuantílico modifica las estimaciones satelitales para lograr una mayor aproximación de la función de probabilidad acumulada (CDF) a la de los datos medidos. La elección de la adaptación específica se basó en la optimización de las métricas de rendimiento resultantes de cada ajuste para los respectivos modelos. Cabe mencionar que este artículo no tiene como objetivo abordar en detalle este punto.

El desempeño de estos modelos respecto de las mediciones en tierra se analizó con las siguientes métricas: *MBE*, *RMSE*, *MAE* y R^2 (*MBE* es el desvío promedio (o sesgo), *RMSE* es el error cuadrático medio, *MAE* es el error absoluto medio y R^2 el coeficiente de determinación). Para los primeros tres se informan también sus correspondientes valores relativos como porcentaje de la media de las medidas terrestres, los cuales nombramos respectivamente: *MBEn*, *RMSEn* y *MAEn*. El valor de normalización en este trabajo es de 420,3 W/m². Los resultados de la evaluación de estos modelos con y sin su ajuste local se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados de las métricas de desempeño de los modelos CAMS y CIM-ESRA con y sin adaptación al sitio respecto de las mediciones en tierra. Las medidas MBE, RMSE y MAE están medidas en W/m²

	MBEn	RMSE	RMSEn	MAE	MAEn	R²
CAMS sin adaptar	-0,99	93,38	22,22	54,94	13,07	0,894
CAMS adaptado	0	91,77	21,83	55,39	13,68	0,886
CIM-ESRA sin adaptar	1,74	76,12	17,32	50,06	11,39	0,926
CIM-ESRA adaptado	0	75,29	17,13	49,31	11,22	0,931

Se observa que los estimados del modelo CIM-ESRA demuestran una adaptación más precisa a la región en comparación con los resultados obtenidos mediante el modelo Heliosat-4. La superioridad del desempeño de CIM-ESRA se origina por dos razones: en primer lugar, hace uso de información del satélite GOES-16 en lugar de MSG, lo cual ofrece ángulos de visión más favorables para la región de la Pampa Húmeda. En segundo lugar, CIM-ESRA se caracteriza por ser un modelo semi-empírico, cuyos parámetros ajustables fueron determinados específicamente para la región en base a datos de 10 ubicaciones durante el periodo 2010-2017. En consecuencia, la referencia de rendimiento para este trabajo la establece en el modelo CIM-ESRA, el cual, además, emplea información del mismo satélite que los datos de entrada utilizados en los algoritmos de aprendizaje automático presentados en este estudio. Por otro lado, se evidencia que entre las métricas examinadas, aquella que muestra una mejora es el sesgo, el cual tiende a aproximarse a 0. Mientras tanto, las demás métricas tienden a mejorar levemente, salvo en el caso del MAE del modelo CAMS donde se observa una pequeña desmejoría. En cualquier caso, la ganancia observada de los métodos de post-proceso para adaptación al sitio es limitada, estando en general por debajo del 1%.

Implementación del modelo CIM-McClear

Se implementó el modelo CIM-McClear con el propósito de contar con una referencia adicional, más exigente, para comparar el rendimiento frente a de los modelos de aprendizaje automático. Además, su

forma de ajuste y testeo es la misma que la utilizada para los algoritmos de aprendizaje automático. Los modelos pertenecientes a la familia CIM (Cloud Index Model) se caracterizan por una estructura que combina un modelo de cielo despejado con un factor de atenuación que considera el efecto de las nubes. Este factor de atenuación, denotado como F , se rige por una función lineal que se vincula al índice de nubosidad derivado de datos satelitales como se ve en la ecuación (2) y (3).

$$GHI = GHI_{CS} * (a + b(1 - N)) \quad (2)$$

$$F(N) = a + b(1 - N) \quad (3)$$

donde a y b son parámetros que se ajustan localmente, GHI_{CS} es la irradiancia en condiciones de cielo despejado (en este artículo se utilizó el modelo McClear) y N es el índice de nubosidad. Se utilizó en este caso el índice $N1$, según la implementación usual. Para realizar la implementación, se tomaron los años 2019, 2020 y 2021, asignando dos de ellos para el entrenamiento y reservando el restante para la validación. El índice de nubosidad N corresponde a una resolución espacial de 100×100 (variable $N1_08$) la cual resultó ser la óptima. La figura 1 muestra la distribución y densidad de los puntos, comparando los valores reales con sus respectivas predicciones. Los promedios de las métricas obtenidas durante estos tres años se presentan en la tabla 4.

Tabla 4: Resultados de los promedios de las métricas de desempeño del modelo implementado CIM-McClear, las medidas MBE, RMSE y MAE están medidas en W/m^2

	MBEn	RMSE	RMSEn	MAE	MAEn	R ²
CIM-McClear implementado	0	70,74	16,15	42,37	13,07	0,943

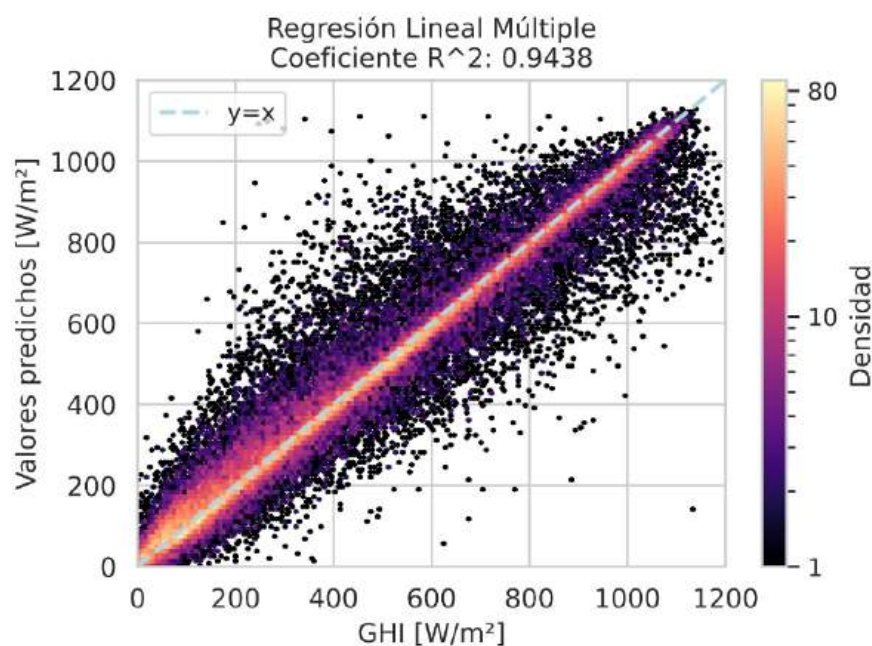


Figura 1: Distribución y densidad de los puntos para los valores reales vs. valores predicho.

Implementación de los modelos de aprendizaje automático

Se utilizaron como entrada las variables mencionadas en la sección *Modelos estadísticos con aprendizaje automático*. Para los modelos implementados se probaron diferentes combinaciones de las variables de entrada, encontrándose que para los algoritmos de aprendizaje automático fue suficiente contar con la información de las variables provenientes de imágenes satelitales. Se presentan las métricas para cada año de validación, siendo el ajuste con los otros dos años que completan el periodo 2019-

2021. En la última columna se presenta el promedio de desempeño entre los 3 años de validación, lo que se usa como valor de comparación con la referencia del CIM-ESRA de la Tabla 3.

El primer objetivo fue saber si las correcciones en el índice de nubosidad N1 que da lugar al índice N2 y la corrección a la reflectancia planetaria R que da lugar a la reflectancia RC llevan a mejoras en los resultados. Con las variables disponibles se armaron 4 distintos conjuntos de datos para encontrar la combinación de variables más adecuada. Cabe aclarar que cada conjunto contiene todo el set de variables de cada tipo en sus distintas resoluciones.

Conjunto 1: R - FR - N1

Conjunto 2: R - FR - N2

Conjunto 3: RC- FR - N1

Conjunto 4: RC - FR - N2

Se aplicaron los modelos de aprendizaje automático RF, GB y RN. El desempeño fue muy similar y no permitió concluir qué conjunto es más adecuado. El mejor desempeño se obtuvo con RN, seguido de RF y por último GB, como se muestra en la Figura 2. Con RN y RF se logró en todos los casos una pequeña mejoría respecto a los resultados (Iturbide, et al. 2023) donde las variables utilizadas fueron FR y R.

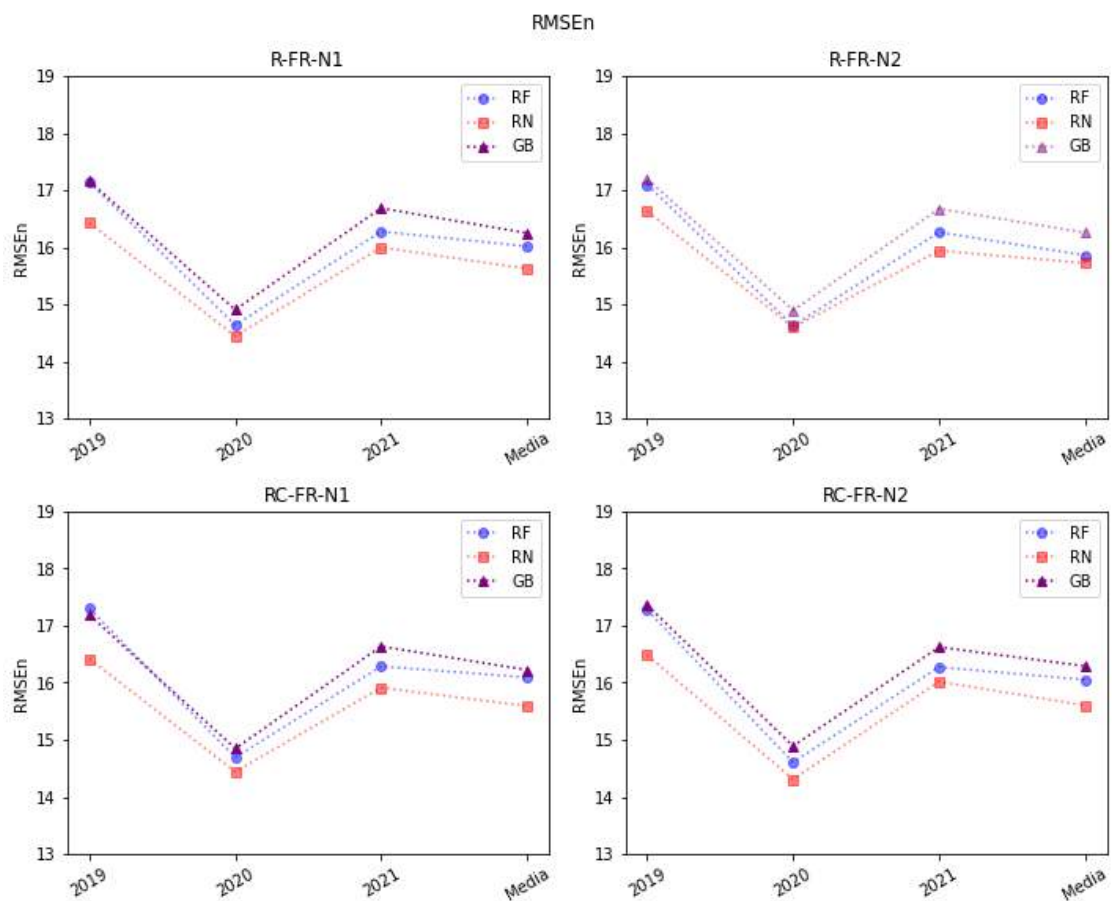


Figura 2: Error cuadrático medio porcentual para los distintos modelos empleados

Reducción de dimensionalidad del conjunto de datos

El conjunto de variables N1, N2, R y RC está altamente correlacionado. Se realizó un análisis de componentes principales para disminuir la dimensión de los conjuntos, reteniendo hasta la componente principal 5 inclusive. En todos los conjuntos el porcentaje de varianza acumulada con estas 5 componentes es mayor al 99.5% y se recuperan los valores RMSEn obtenidos al trabajar con todas las variables (diferencias menores al 0,05%). Tomar más componentes principales no mejora los desempeños (ver tabla 4).

Se buscaron qué variables eran las más relevantes para el modelo. Para eso, se analizó primero qué variable presenta mayor correlación con la variable a predecir. En todos los casos (FR, R, RC, N1 y N2) estas variables se encuentran alrededor de la resolución media (variables 9 o 10). Se buscaron 2 variables más en los extremos de las resoluciones. La búsqueda no fue exhaustiva y se encontraron mejores resultados con RN que con RF. Cuando se reduce la dimensión del conjunto de esta manera, RF aumenta 0,4% aproximadamente respecto al desempeño del algoritmo sobre el conjunto de datos que contiene a todas las variables, mientras que la RN da valores más cercanos y aumenta 0,2% como máximo. Para mejorar el desempeño se agregó la variable geométrica cosz. Con la referencia geométrica los dos algoritmos se aproximan a los valores de desempeño cuando se utilizan todas las variables.

Los resultados de los desempeños promediados en los 3 años se muestran en la Figura 3 para los algoritmos RF y RN en los conjuntos de datos formados con: todas las variables (A), las 5 primeras componentes principales (B), una selección de variables (C) y la selección anterior más cosz (D). En particular se muestran los resultados del conjunto 4: RC - FR - N2. La selección C corresponde a FR2, FR10, FR14, N2_1, N2_9, N2_14, RC1, RC10 y RC14.

Tabla 4: Resultados de los modelos de ML utilizando las variables FR-RC-N2.

	MBEn	RMSE	RMSEn	MAE	MAEn	R²
RF A	-0,08	70,25	16,05	42,86	9,80	0,939
RN A	0,03	68,32	15,60	41,88	9,57	0,943
RF B	-0,07	70,29	16,06	42,92	9,81	0,939
RN B	0,05	68,14	15,56	41,44	9,47	0,944
RF C	-0,04	71,92	16,42	43,84	10,02	0,937
RN C	-0,34	69,01	15,75	41,29	9,43	0,943
RF D	0,05	70,11	16,01	41,95	9,59	0,941
RN D	0,04	68,65	15,67	41,78	9,55	0,943

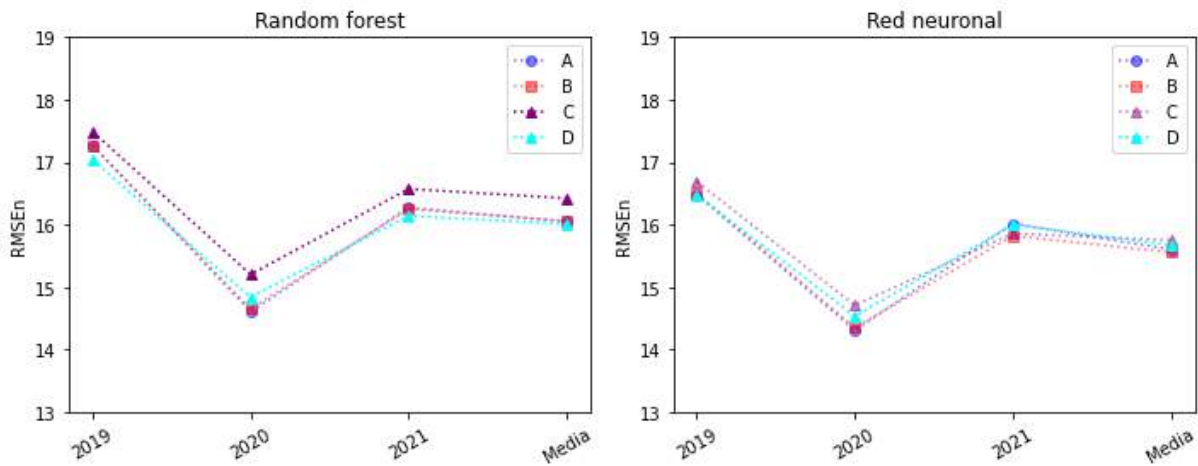


Figura 3: Error cuadrático medio porcentual para los algoritmos RF y RN de las 4 selecciones de datos utilizadas para las variables RC - FR - N2

Visualización comparativa de estimaciones

Las Figuras 4 y 5 exhiben las proyecciones generadas por la RN (representadas por la línea roja) en contraste con los valores registrados en tierra (indicados por la línea punteada), junto con la estimación obtenida mediante la implementación del modelo CIM-McClear, que se distinguió como la más precisa en términos de comparación, para días con nubosidad y claros, respectivamente. Existe notoria concordancia entre las aproximaciones, aunque se aprecian sutiles diferencias en las mismas. Tanto la RN como el modelo CIM-McClear logran de manera efectiva capturar las condiciones de nubosidad y la GHI en términos generales.

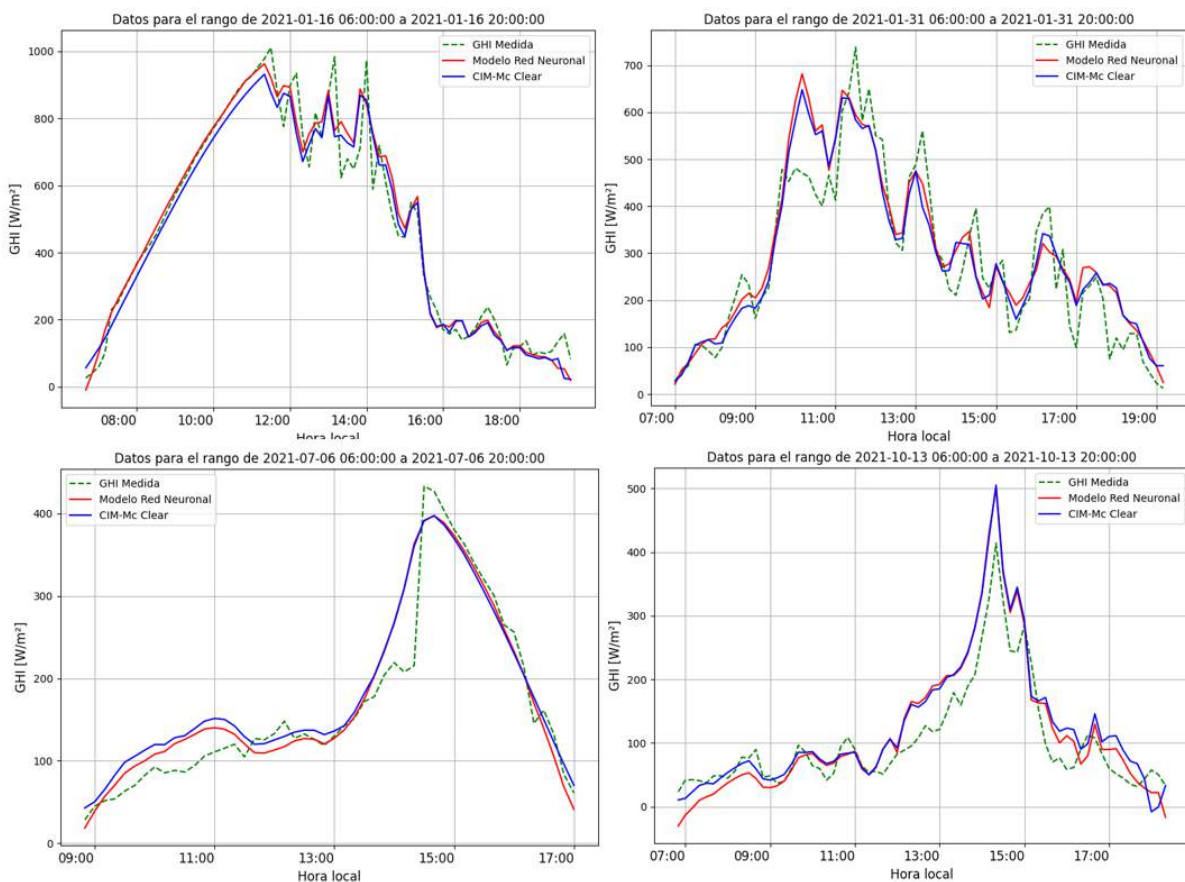


Figura 4: Gráficos comparativos entre las medidas de tierra, el modelo CIM-McClear implementado y la red neuronal para cuatro días de 2021 en condiciones de nubosidad.

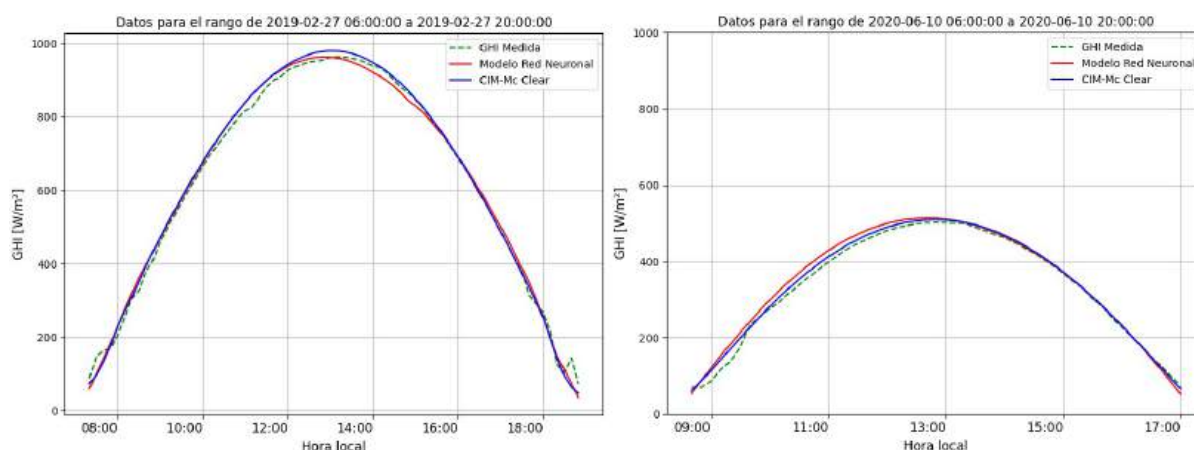


Figura 5: Gráficos comparativos entre las medidas de tierra, el modelo CIM-McClear implementado y la red neuronal para dos días despejados de 2021.

CONCLUSIONES

Entre los diversos algoritmos de Aprendizaje Automático utilizados en este estudio, se observó un mejor rendimiento por parte de la RN, seguido del método de RF, mientras que el método de GB quedó rezagado. La combinación de variables FR, RC y N2 mostró los resultados más favorables, obteniendo un error cuadrático medio promedio porcentual del 15,56% después de la reducción de la dimensionalidad mediante el análisis de componentes principales. Al comparar con el modelo de referencia CIM-ESRA, los modelos empíricos de ML demostraron un rendimiento superior. Las métricas comparativas entre CIM-ESRA y la RN favorecieron a esta última: MAEn de 9,7% vs. 11,3%, RMSEn de 15,6% vs. 17,1%.

Una comparación interesante surge con el modelo CIM-McClear, que logró un RMSEn promedio de 16,15% y un sesgo nulo. Cabe destacar que este modelo requiere solo la entrada del modelo de cielo claro y una variable de nubosidad parametrizada mediante una función lineal. Su simplicidad ofrece un rendimiento menor pero similar al aprendizaje automático, que además utiliza información espacial multiescala.

El análisis de componentes principales no redujo de manera significativa los errores. En resumen, el modelo de ML propuesto mejora las estimaciones para la región, superando a modelos ajustados al sitio y al CIM-McClear ajustado localmente, con métricas de desempeño levemente mejores.

En futuros trabajos se debe analizar el comportamiento del modelo empírico en otras áreas de la Pampa Húmeda, extrapolando espacialmente mediante pruebas en una ubicación distinta. También sería recomendable considerar otras variables satelitales relevantes, como los canales infrarrojos del satélite, que brindan información adicional sobre el sistema Tierra-Atmósfera y podrían mejorar la precisión de las estimaciones de radiación solar. Evaluar la inclusión de este canal en el modelo y su impacto en el rendimiento sería valioso.

REFERENCIAS

- Abal, G., Aicardi, D., Alonso-Suárez, R., y Laguarda, A. (2017). Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. *Solar Energy*, 141:166–181.
- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Siri, R., y Musé, P. (2012). Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: application to Uruguay. *Solar Energy*, 86, 3205–3215. doi: 10.1016/j.solener.2012.08.012.

- Aristegui, R.; Iturbide, P.; Stern, V.; Lell, J.; Righini, R. (2019). Variabilidad de corto plazo y valores extremos de la irradiancia solar en la Pampa Húmeda Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, vol. 23, pág. 19-30.
- Gonzalez, J., Teixeira-Branco, V., y Alonso-Suárez, R. (2019). Evaluation of the Heliosat-4 and FLASH-Flux models for solar global daily irradiation estimate in Uruguay. En *ISES Conf. Proceedings, Solar World Congress*.
- Iturbide, P., Alonso-Suarez, R., Ronchetti, F. (2023). An Analysis of Satellite-Based Machine Learning Models to Estimate Global Solar Irradiance at a Horizontal Plane. In: Naiouf, M., Rucci, E., Chichizola, F., De Giusti, L. (eds) *Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics. JCC-BD&ET 2023. Communications in Computer and Information Science*, vol 1828. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40942-4_9
- Jiménez, V. A., Will, A., & Rodríguez, S. (2017). Estimación de radiación solar horaria utilizando modelos empíricos y redes neuronales artificiales. *Ciencia y tecnología*, (17), 29-45.
- Laguarda, A., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M. J., Luza, S., Burgos, B. L., Stern, V., y Alonso-Suárez, R. (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 48, 1-9.
- Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda region. *Solar Energy*, 199:295–307.
- Laguarda, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2018). Modelo semi-empírico de irradiación solar global a partir de imágenes satelitales GOES. *Anales del VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Qu, Z., Wald, L., Homscheidt, M. S., y Arola, A. (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, European Geosciences Union, 6 , 2403–2418. doi:10.5194/amt-6-2403-2013.
- Long, C. N., & Shi, Y. (2008). An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2(1).
- McArthur, L. (2005). *Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual*. Td-no. 1274, wrcp/wmo, World Meteorological Organization (WMO, www.wmo.org).
- Olivera, L., Atia, J., Amet, L., Osio, J., Morales, M., & Cappelletti, M. (2020). Uso de redes neuronales artificiales para la estimación de la radiación solar horaria bajo diferentes condiciones de cielo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 24, 232-243.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., & Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, 45(2), 111-114.
- Perez, R., Cebecauer, T., & Šúri, M. (2013). Semi-empirical satellite models. *Solar energy forecasting and resource assessment*, 21-48.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., y Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57.
- Raichijk, C. (2008). Estimación de la irradiación solar global en Argentina mediante el uso de redes neuronales. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0328-932X)*. Vol. 22, pp. 1 - 6.
- Salazar, G. A., Alonso-Suárez, R., Cirigliano, A. L., y Ledesma, R. D. (2021). Evaluación del proceso de adaptación al sitio aplicado a la irradiancia solar global medida en la ciudad de Salta, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 25, 353-362.
- Sarazola, I., Laguarda, A., Ceballos, J. C., y Alonso-Suárez, R. (2023). Benchmarking of modeled solar irradiation data in Uruguay at a daily time scale. *IEEE Latin American Transactions*.
- Sayago, S., Bocco, M., Ovando, G., & Willington, E. A. (2011). Radiación solar horaria: modelos de estimación a partir de variables meteorológicas básicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.
- Verbois, H., Saint-Drenan, Y.-M., Becquet, V., Gschwind, B., Blanc, P. (2023). Retrieval of surface solar irradiance from satellite using machine learning: pitfalls and perspectives, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-243>.
- Yang, D. (2020). Choice of clear-sky model in solar forecasting. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 12, 026101, <https://doi.org/10.1063/5.0003495>.
- Young, A.T. (1994). Air mass and refraction. *Applied optics*, 33 6, 1108-10 .

MACHINE LEARNING MODELS FOR ESTIMATING SOLAR RADIATION ON THE HORIZONTAL PLANE USING MULTISCALE SATELLITE INFORMATION

ABSTRACT: The lack of precision in solar radiation data impacts the solar energy projects risk. Ground measurement networks provide limited information due to their sparse spatial distribution. This leads to estimation models based on satellite imagery, solving the spatial issue if carefully adjusted to quality ground measurements. In this article, we develop and validate an empirical Machine Learning (ML) model for satellite-based solar radiation estimation, demonstrating its usefulness and accuracy in the studied region. The models are fed with variables from GOES-16 satellite imagery, McClear model estimates, and geometric data. Our results suggest that for certain proposed models, satellite information is sufficient for accurately estimating solar radiation, by obtaining the temporal reference from implicit relationships between the considered satellite variables. Given the size of the data set, we propose a principal component analysis to reduce dimensionality. In order to compare the proposed model, we adapt Heliosat-4 and CIM-ESRA estimates to the site and implement the CIM-McCclear model. The results indicate that the proposed model outperforms others, although slightly, showing how difficult it is to further improve solar radiation satellite-based estimation.

Keywords: Solar radiation, Machine Learning, Satellite images, GOES16, GHI.

EVALUACIÓN EN URUGUAY DEL PRODUCTO DSR GOES-16 DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL

R. Ledesma¹, R. Alonso-Suárez^{2,3}, A. Monetta², A. Laguarda³, O. Vilela⁴, G. Salazar¹

¹Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

²Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del Litoral, CENUR Litoral Norte, Udelar

³Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Udelar

⁴Departamento de Energía Nuclear, Centro de Tecnología, Universidad Federal de Pernambuco

E-mail: rledesma@exa.unsa.edu.ar, r.alonso.suarez@gmail.com

RESUMEN: La información sobre el recurso solar es esencial para el desarrollo de aplicaciones que utilicen esta fuente energética. En ausencia de mediciones terrestres o estimaciones satelitales con modelos localmente adaptados, los usuarios tienden a recurrir a otras bases de datos disponibles. Estas bases de datos usualmente se componen de estimaciones de origen satelital o modelado atmosférico que no siempre alcanzan desempeños adecuados. Conocer el desempeño de tales herramientas es por tanto importante para asesorar de mejor manera a los usuarios del sector solar. En este estudio se evalúa por primera vez en Uruguay el desempeño del producto GOES-16 de irradiancia solar global horizontal (DSR) elaborado por la NESDIS/NOAA. El modelo Heliosat-4, largamente evaluado en esta región, se incluye en el análisis como referencia. La comparación demuestra que el producto GOES-DSR presenta un desempeño inferior al de Heliosat-4 en la región. Se obtuvo un RMSE porcentual de 19-20 %, un desvío estándar de 88 W/m² y un MBE porcentual de +3 % para el GOES-DSR, en comparación al 17-18 %, 70 W/m², y -1.5 %, respectivamente, del Heliosat-4. Los indicadores del Heliosat-4 son consistentes con evaluaciones previas en Uruguay.

Palabras clave: irradiancia solar, GHI, estimación satelital, Uruguay, GOES-DSR, Heliosat-4

INTRODUCCIÓN

El diseño y dimensionamiento de emprendimientos de aprovechamiento de la energía solar requiere información del recurso solar disponible en el emplazamiento elegido. El tamaño del proyecto, en particular, el volumen de la inversión, determina la calidad exigida para los datos base de radiación solar que serán utilizados. Los emprendimientos de gran escala requieren información de recurso muy precisa y de baja incertidumbre, dado que pequeñas diferencias entre la predicción del recurso y la realidad futura puede resultar en menores rentabilidades de las esperadas o afectar críticamente el flujo de caja de los proyectos (Schnitzer et al., 2012; McMahan et al., 2013). En cambio, para proyectos más chicos, por ejemplo, residenciales, empresariales o industriales de bajo porte, información menos precisa puede ser suficiente, siempre que los sesgos de los valores mensuales y anuales de largo plazo estén caracterizados. En este contexto, la evaluación de las fuentes de datos disponibles es información relevante para poder asesorar a los usuarios, atendiendo la aplicación específica de cada uno. Esto es especialmente importante para las fuentes de datos de libre distribución, dado que en ausencia de mejor información, los usuarios tienden a confiar en ellas sin visión crítica ni mayores cuestionamientos.

Existen varias bases de datos de acceso gratuito que proveen información de radiación solar para sitios arbitrarios, es decir, en ubicaciones que un usuario puede elegir ad-hoc ingresando las coordenadas geográficas o seleccionando en un mapa. Dependiendo de la escala temporal en que se provee la información (10-minutal, horaria, diaria, mensual, anual), estas bases pueden estar compuestas de interpolaciones de

medidas terrestres, datos de reanálisis de modelos numéricos de atmósfera, o estimaciones por satélite. Dado que la medición terrestre presenta serias limitaciones de extrapolación espacial y los modelos de atmósfera tienden a subrepresentar la nubosidad, la única opción capaz de producir estimaciones confiables de radiación solar para sitios arbitrarios es la de origen satelital. Naturalmente, si uno cuenta con mediciones de calidad de radiación solar en sitio por varios años en el emplazamiento del proyecto, o cercano a él, esta sería la mejor información disponible, no obstante, es una situación muy infrecuente. La estimación de la irradiancia solar mediante imágenes satélites surge como una herramienta útil en situaciones en donde no se cuenta con información medida en el sitio específico, lo que es la situación más común. Para poder hacer uso de esta información, adaptarla al sitio, o desarrollar modelos satelitales localmente ajustados, la información medida en tierra es absolutamente fundamental, pero alcanza con que esté disponible dentro de la región climática afín. Esto relaja el requerimiento de disponibilidad de medida terrestre, en especial, la densidad espacial necesaria de las mediciones, un aspecto en que una red de medida en tierra no podría competir con la información satelital (Perez et al., 1997; Zelenka et al., 1999). En suma, la medición terrestre y la información satelital tienen una relación de complementariedad, donde la medida terrestre aporta la referencia para ajuste y/o validación de modelos, y la información satelital provee la espacialidad. La ganancia de espacialidad conlleva el costo de un aumento de incertidumbre respecto a lo que se lograría con una medida de calidad en el sitio específico. Aun así, resulta en información de menor incertidumbre y más detallada que la interpolación de mediciones terrestres si los sitios de medición están separados más de algunas pocas decenas de kms. El estudio a escala diaria de Gallegos y Lopardo (1988) demostró que en la Pampa Húmeda, al igual que en otras regiones, el error al extrapolar la irradiancia solar medida puede ser alto incluso para distancias cortas.

La nueva serie de satélites geostacionarios GOES de la NOAA¹ (GOES16 y GOES17) implementa el producto llamado DSR (Downward Shortwave Radiation) mediante el cual se puede obtener una estimación de irradiancia global horizontal (GHI) de las imágenes satelitales (Laszlo et al., 2020). Este nuevo producto fue desarrollado por la STAR/NESDIS/NOAA² principalmente en el marco de la evaluación del balance radiativo terrestre, fundamental para entender la dinámica atmosférica, la circulación oceánica y el calentamiento global, entre otros fines. Las estimaciones se generan a través de un modelo de transferencia radiativa (RTM) que utiliza las imágenes hiperespectrales GOES (reflectancias en el espectro solar), propiedades de nubes, aerosoles, agua precipitable, ozono, y albedo de superficie terrestre obtenidos de productos GOES, e información auxiliar de modelos atmosféricos. Las estimaciones del GOES-DSR son de libre acceso y están integradas a los mecanismos de distribución de información satelital GOES. Los datos de GHI provistos por este producto han sido evaluados contra las mediciones de la red SURFRAD en Estados Unidos (Laszlo et al., 2020) y en varios sitios de Oceanía, Asia y América del Norte (Li et al., 2023). En particular, en Li et al. (2023) se compara el desempeño del GOES-DSR contra otras bases de datos satelitales disponibles que utilizan RTM, encontrando un desempeño relativamente bajo para este producto. Dicho trabajo incluye un único punto en Sudamérica (Florianópolis, Brasil), pero no desglosa el desempeño en dicho sitio. Por tanto, el producto GOES-DSR aún no ha tenido una evaluación específica en Latinoamérica.

En este trabajo se evalúa el desempeño de la estimación de GHI horaria del producto GOES-DSR en dos sitios de Uruguay ubicados al norte y al sur del país. Se utiliza una estadística de tres años de datos en cada sitio (2020-2022) y se compara el desempeño con la base de datos satelital CAMS³ que provee estimaciones del modelo Heliosat-4 (Qu et al., 2017). Este modelo se toma como referencia debido a su fácil acceso y a que ha sido evaluado previamente en esta región en varios trabajos (Gonzalez et al., 2019; Laguarda et al., 2020, 2021; Iturbide et al., 2023; Sarazola et al., 2023). Esto permite establecer dónde se ubica este nuevo producto en términos de desempeño, dado que el producto CAMS ya ha sido

¹National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Estados Unidos.

²Center for Satellite Applications and Research (STAR), National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), Estados Unidos.

³Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

intercomparado en los trabajos previos con otras bases de información satelital disponibles. La evaluación del GOES-DSR presentada aquí es la primera dedicada a sitios en Latinoamérica, y por extensión, en la Pampa Húmeda sudamericana, donde se ubica el territorio de Uruguay.

MEDICIONES TERRESTRES

Los datos medidos fueron provistos por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República, Uruguay. Se trata de datos horarios de irradiancia solar global horizontal (promediada en la hora) para el periodo 2020-2022 y de dos sitios de dicho país, al Norte (LE) y al Sur (LB), según se muestran en la Tabla 1. Estas medidas fueron registradas a escala minutal con piranómetros Kipp & Zonen CMP10, de Clase A y respuesta espectral plana según la norma ISO 9060:2018. Estos datos son representativos de un clima templado-cálido y húmedo con veranos calurosos, típico de la Pampa Húmeda, categorizada como Cfa en la clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007).

Tabla 1: Sitios de Uruguay analizados. LE: Norte del país. LB: Sur del país.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (metros s.n.m)
LB	-34.6720	-56.3401	38
LE	-31.2827	-57.9181	56

Cuando se dispone sólo de la medida de GHI, los controles de calidad que se pueden aplicar a las mediciones son relativamente limitados. En este caso, se aplicó un filtro de envolvente máxima basado en el modelo de cielo claro ESRA (Rigollier et al., 2000). Este modelo de cielo claro depende de un único parámetro conocido como Turbidez de Linke, T_L . Para utilizarlo como filtro de valores máximos de GHI, se utiliza un valor bajo de turbidez, en este caso, $T_L = 2$, lo que es un valor suficientemente bajo para actuar de esta manera en el territorio de Uruguay (Abal et al., 2017).

ESTIMACIÓN SATELITAL

La estimación satelital de GHI es un proceso por el cual se usan –principalmente– las imágenes de un satélite geoestacionario para estimar la cantidad de irradiancia solar que llega a la superficie terrestre (Perez et al., 2002). Esto es útil para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la evaluación y pronóstico de recursos de energía solar, la planificación agropecuaria, y la modelización climática. Los modelos basados en satélites tienen la ventaja de poder producir estimaciones en alta resolución espacial (1-2 km) y temporal (10-15 mins) de la radiación solar sobre extensas regiones territoriales. Existen diversos servicios de datos que implementan algún modelo de estimación satelital, entre ellos se encuentran NASA POWER Data Series, la National Solar Radiation Data Base del NREL⁴, LSA-SAF de EUMETSAT⁵ y el servicio de CAMS, entre otras. Este trabajo analiza el producto DSR que ofrece la NESDIS/NOAA en base a la nueva serie de satélites GOES.

El satélite GOES-16

El GOES16 es un satélite meteorológico de la nueva serie de satélites GOES que se lanzó en el año 2016 por la NOAA. Este satélite cuenta con una amplia gama de sensores que se utilizan para monitorear y proporcionar información sobre la actividad meteorológica en tiempo real. Algunos de los sensores incluidos en el GOES16 son: el ABI (Advanced Baseline Imager), que proporciona imágenes de alta resolución de la Tierra en tiempo real y permite vigilancia meteorológica y elaboración de diversos productos satelitales; el GLM (Geostationary Lightning Mapper) que se utiliza para detectar y monitorear la actividad eléctrica en las nubes (rayos) en tiempo real; y el SEISS (Space Environment In-Situ Suite), que se utiliza para monitorear la actividad solar y su impacto en la Tierra. La información de los sensores es manipulada y combinada entre sí generando productos que pueden ser utilizados para diversos estudios

⁴National Renewable Energy Laboratory (NREL), Estados Unidos.

⁵European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), Alemania.

meteorológicos, del Sol, y del clima espacial. Puede consultarse la lista de los productos generados por la serie GOES en <https://www.goes-r.gov/products/overview.html>.

El modelo DSR

La sigla DSR se refiere a la radiación solar descendente de onda corta que llega a la superficie terrestre. El producto GOES-DSR (Laszlo et al., 2020) utiliza el algoritmo híbrido ESP SRB (Enterprise Processing System Shortwave Radiation Budget), desarrollado para estimar la DSR y la RSR (radiación solar reflejada al espacio exterior) a partir de las imágenes de reflectancia del ABI dentro del espectro solar. Este proceso implica varios pasos, que incluyen la calibración de los datos del sensor, la corrección atmosférica para el caso de cielo despejado, y la determinación de la cantidad de nubes y aerosoles presentes.

La implementación del algoritmo SRB se realiza de manera individual a nivel de píxeles. A cada píxel se le asigna una de cuatro categorías: cielo despejado sin nieve/hielo, cielo despejado sobre nieve/hielo, nube de agua y nube de hielo. El algoritmo considera dos caminos para establecer la estimación en función de la disponibilidad de información de entrada de Nivel 2 (L2)⁶. Si se dispone de estimaciones L2 de albedo de superficie, profundidad óptica de aerosoles y albedo de dispersión simple para escenas despejadas, o profundidad óptica de nubes/radio/altura de tope para escenas nubladas, se selecciona una secuencia de procesamiento denominada ruta directa. Si falta alguno de estos valores necesarios, se utiliza otra secuencia denominada ruta indirecta. La disponibilidad de productos L2 de agua precipitable total y ozono no se considera en la selección de la ruta, debiéndose tener en ambos casos. En caso de no haber estimaciones L2 de estas cantidades, la información se toma del GFS (Global Forecast System).

La ruta directa es una adaptación del modelo CERES (Rutan et al., 2015; Fillmore et al., 2022), donde se utilizan tablas de búsqueda precalculadas con el RTM de Fu y Liou (1993) utilizando como entrada las variables descritas anteriormente, en particular, propiedades de nubes y aerosoles, albedo de superficie, columna de agua precipitable y ozono. El RTM considera 18 bandas espectrales, lo que permite un modelado adecuado de la dispersión de Rayleigh, la absorción por ozono y la absorción en el infrarrojo cercano por otros gases minoritarios, procesos críticos para la radiación en cielo despejado. Para el caso nublado, se utilizan las estimaciones L2 de la profundidad óptica de nubes, el tamaño de las partículas en la nube y la altura del tope nuboso. Este enfoque es aplicado a escenas claras y nubladas, con distintas tablas de búsqueda en cada caso, y con una serie de entradas que sea compatible con las capacidades computacionales, dado que la cantidad de simulaciones escala en forma exponencial con la cantidad de entradas y de bandas espectrales consideradas.

La ruta indirecta se utiliza cuando no se pueden obtener los productos L2 requeridos. En este caso, se utilizan las reflectancias del ABI y relaciones precalculadas entre la transmisividad de la atmósfera y la reflectividad en el tope de la atmósfera para los casos de cielo claro y cielo nublado (Pinker y Laszlo, 1992). Estas relaciones precalculadas dependen de otra serie de parámetros atmosféricos que se deben estimar. Para ello se adoptan las mismas tablas de búsqueda que las utilizadas en la ruta directa, garantizando un cálculo coherente de la transferencia radiativa. Estas tablas se interpolan, primero y para ambos casos (despejado y nublado), con el ángulo cenital solar, la elevación del terreno, y la cantidad de vapor de agua y de ozono. Para cielo despejado se interpolan además con el valor climatológico del albedo de dispersión simple para aerosoles, y para cielo nublado por el radio efectivo de las nubes y la altura de tope nuboso. Como resultado, se obtienen los valores faltantes para establecer la relación transmitancia-reflectancia, y así calcular los flujos de radiación de onda corta. Más detalles se pueden consultar en Laszlo et al. (2020).

⁶Esta es una forma usual de referirse a los productos satelitales derivados de la información medida por el satélite, usualmente por modelos, parametrizaciones, o combinaciones de bandas espectrales.

Acceso a las estimaciones GOES-DSR

Los estimativos de GOES-DSR fueron obtenidos mediante el servicio en la nube Amazon S3 proporcionado por la NOAA para hacer disponible la descarga de las imágenes satelitales y productos de GOES. En <https://github.com/aws-labs/open-data-docs/tree/main/docs/noaa/noaa-goes16> puede consultarse la documentación para descargar los estimativos. De la descarga se obtiene el producto GOES-DSR para toda la imagen full-disk (disponible a todas las horas en punto), de las cuales se construyeron las series temporales para los sitios de estudio.

RESULTADOS

Los valores de GHI medidos fueron comparados contra las estimaciones del modelo Heliosat-4, descargado del portal CAMS, y del producto GOES-DSR para ambos sitios de estudio. Las métricas utilizadas para la evaluación del desempeño son la desviación estándar STD, el error absoluto medio MAE, la desviación media del sesgo MBD y el desvío cuadrático medio RMSE, que se definen como,

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}, \quad \text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}, \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}, \quad \text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}},$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}},$$

donde y e \hat{y} son los valores de GHI medidos y estimados por los modelos, respectivamente, $e = \hat{y} - y$ es el error de estimación, n es el tamaño de la muestra, y \bar{x} denota la media de la variable. Los indicadores de la primera fila pueden expresarse en términos relativos como porcentaje de la media de las medidas (\bar{y}), denominados aquí MBE %, MAE %, RMSE %, y STD %, respectivamente.

Evaluación de los modelos

En la Tabla 2 se muestran los distintos indicadores del desempeño en valores absolutos de cada uno de los modelos. En ambos sitios se observa que el modelo Heliosat-4 presenta una subestimación respecto a la medida con $\text{MBE} \sim -6 \text{ W/m}^2$, por el contrario, en términos generales GOES-DSR sobrestima el recurso entorno con un $\text{MBE} \sim 15 \text{ W/m}^2$. Esta es una diferencia marcada entre ambos estimativos. El resto de las métricas son consistentes entre sí, y muestran un desempeño inferior del GOES-DSR frente al Heliosat-4, con mayor dispersión en las tres métricas consideradas y menor correlación.

Tabla 2: Indicadores de desempeño en términos absolutos.

Código de estación	Modelo satelital	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	STD (W/m ²)	r (adim.)
LB	Heliosat-4	-6.3	43.2	71.4	71.1	0.97
LB	GOES-DSR	14.0	50.0	88.5	87.3	0.95
LE	Heliosat-4	-7.0	42.1	69.1	68.8	0.97
LE	GOES-DSR	15.1	52.0	90.8	89.6	0.95

La Tabla 3 muestra los indicadores de desempeño porcentuales expresados en términos relativos respecto a la media de la medida. En términos cuantitativos, se obtuvieron, para LE y LB respectivamente, valores de MBE de -1.5 % y -1.6 %, y RMSE % de 17.0 % y 18.0 % para el Heliosat-4, mientras que para GOES-DSR se encontraron MBE de 3.2 % y 3.1 % y RMSE de 19.3 % y 19.8 %. El valor de 17-18 % obtenido para los estimativos del portal CAMS es consistente con los hallados en Laguarda et al. (2020), donde se encontró un RMSE % promedio en Uruguay de 17.9 %, y de 17.3 % y 17.5 % respectivamente para estos sitios. Esto permite establecer que la comparación realizada aquí es consistente y puede ser tomada como

Tabla 3: Indicadores de desempeño expresados en términos relativos.

Código de estación	Modelo satelital	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)	STD (%)
LB	Heliosat-4	-1.6	10.5	17.0	16.9
LB	GOES-DSR	3.1	11.15	19.8	19.5
LE	Heliosat-4	-1.5	9.0	18.0	14.6
LE	GOES-DSR	3.2	11.0	19.3	19.0

referencia para comparar con otras evaluaciones de modelos satelitales realizadas en la región. Esto ubica al modelo GOES-DSR como un modelo con desempeño un poco inferior a otras alternativas disponibles en la región, de los evaluados hasta la fecha (Sarazola et al., 2023).

En las Figs. 1 y 2 se presentan los gráficos de dispersión entre la medición terrestre y la estimación de cada modelo, para las estaciones de LE y LB respectivamente. A simple vista se observa una mayor dispersión de las estimaciones del modelo GOES-DSR en comparación al Heliosat-4 para condiciones de baja irradiancia en ambos sitios.

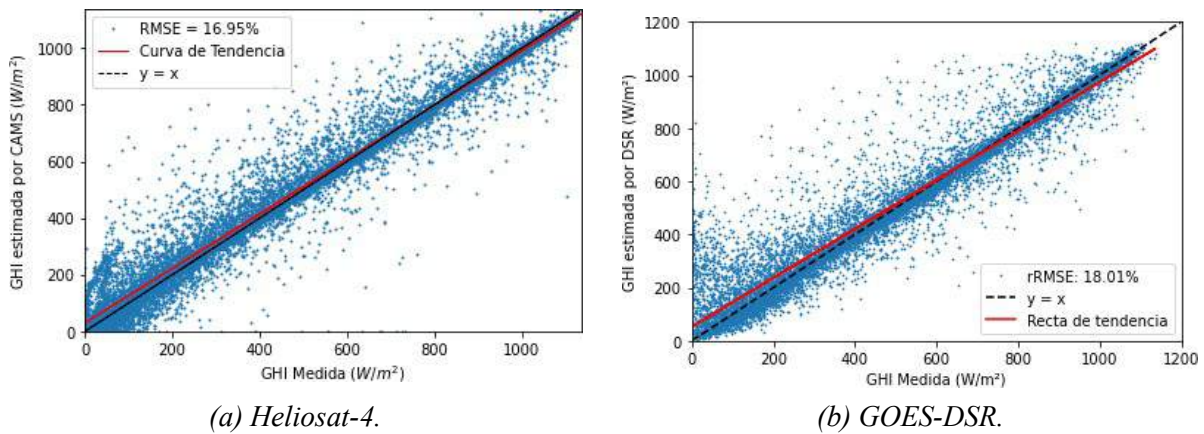


Figura 1: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para la estación LE.

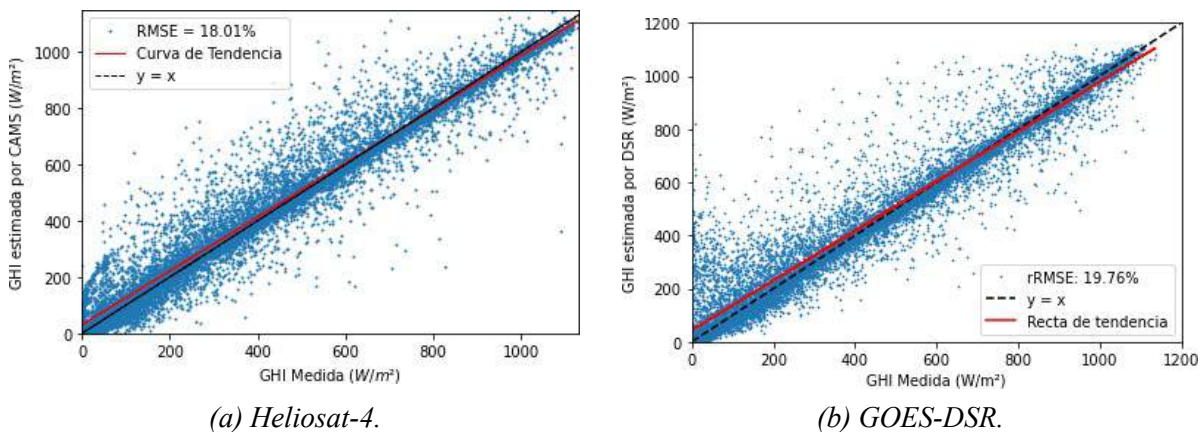


Figura 2: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para la estación LB.

Discriminación del desempeño

Para profundizar la evaluación y comparación de los modelos, se evaluó el RMSE % en función de la altura solar (α_s) y el índice de claridad (k_t), definido como el cociente entre la GHI y el correspondiente valor en el tope de la atmósfera, y la declinación solar, como proxy para la evolución anual.

La variación del desempeño como función de a_s y k_t se muestra en las Figs. 3 y 4, respectivamente. En ambos casos se observa un menor desempeño del GOES-DSR en comparación al Heliosat-4 para la mayoría de las condiciones, exceptuando las condiciones de cielo despejado ($k_t > 0.65$) donde ambos presentan desempeños similares. Cabe destacar que para condiciones de alta claridad, i.e. $k_t > 0.75$, el GOES-DSR funciona levemente mejor que CAMS, ya que su RMSE % es menor por aproximadamente un 1%. La diferencia de desempeños se acentúa notoriamente para alturas solares bajas ($a_s < 20^\circ$) y cielo totalmente cubierto por nubosidad ($k_t < 0.25$), donde el desempeño del GOES-DSR disminuye notoriamente, superando en RSMD % en más de un 300 % al de CAMS para $a_s < 10^\circ$. Notar que los valores porcentuales de error se disparan para k_t muy bajo debido a que la media de normalización es significativamente menor en estas condiciones.

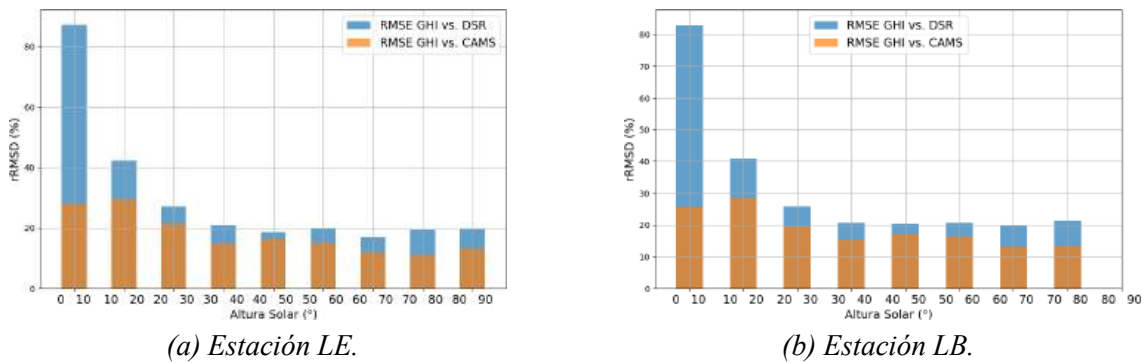


Figura 3: RMSE % como función de la altura solar.

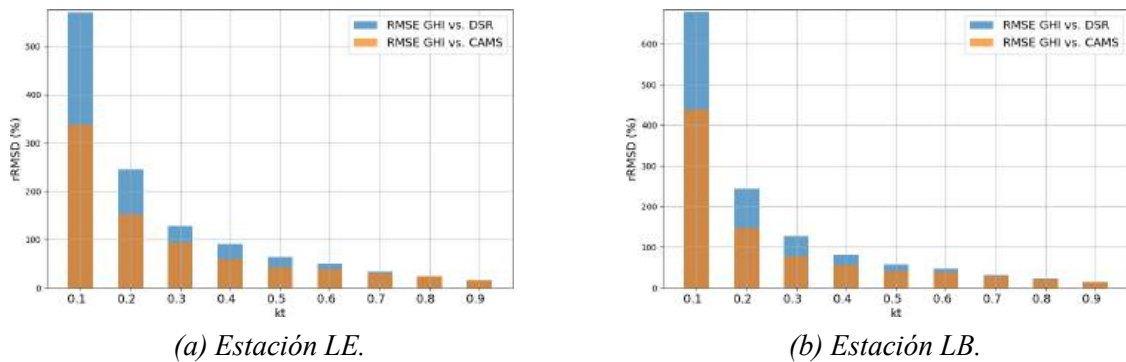


Figura 4: RMSE % como función del índice de claridad.

La variación del RMSE % con el ángulo de declinación solar se muestra en la Fig. 5. Se puede observar que el error de ambos modelos tiende a incrementarse en los días correspondientes al otoño austral. Esta es la primera vez que se analiza la estacionalidad del error de la estimación satelital en la región, dado que en general es un comportamiento que se estudia poco a pesar de ser relevante.

CONCLUSIONES

El modelo GOES-DSR presenta una mayor incertidumbre en Uruguay respecto a los valores estimados por el modelo Heliosat-4. En condiciones de cielo claro ambos modelos tienen un RMSE % similar, teniendo incluso el modelo GOES-DSR un 1 % de ganancia para las condiciones de cielo muy despejado. Dejando esa condición particular de lado, el modelo GOES-DSR presenta menor desempeño para el resto de las condiciones, en particular, para valores de nubosidad intermedia y total, y para todas las alturas solares. Para altos niveles de nubosidad y muy baja altura solar la diferencia entre ambos modelos se incrementa significativamente.

Ambos modelos presentan un error que aumenta conforme disminuye la altura solar y el índice de cla-

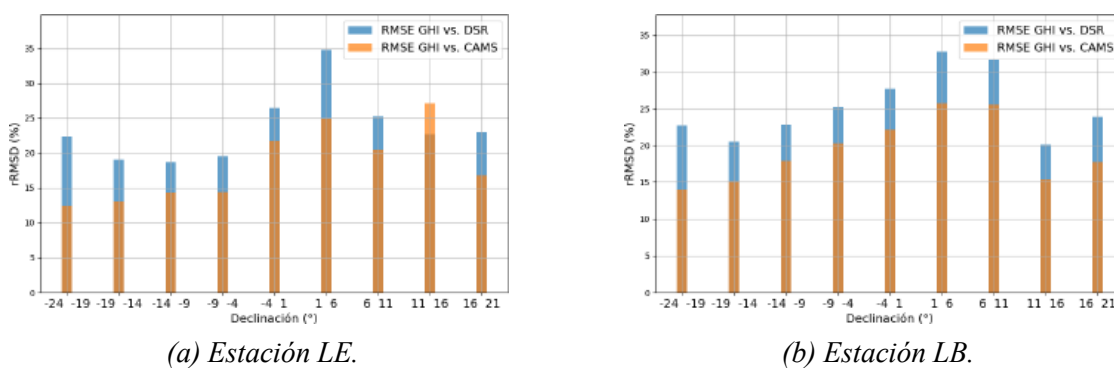


Figura 5: RMSE % como función de la declinación solar.

ridad. Este aspecto ya fue estudiado para el CAMS en Laguarda et al. (2020), obteniéndose el mismo comportamiento. Este problema es mayor en la estimación del modelo GOES-DSR (su manual recomienda la utilización de este producto para alturas solares mayores a 20°). Los modelos satelitales de estimación de irradiancia solar asumen en general ciertas características atmosféricas y geométricas. A alturas solares bajas, estas suposiciones pueden volverse menos precisas debido a efectos atmosféricos y geométricos más pronunciados. Por lo tanto, es importante considerar estas limitaciones al interpretar las estimaciones de irradiancia solar en diferentes momentos del día y en diferentes ubicaciones geográficas.

El desempeño evaluado para el Heliosat-4 coincide con otras evaluaciones hechas para la misma región. La comparación relativa entre ambos permite ubicar aproximadamente a las estimaciones GOES-DSR en un ranking de desempeño regional. Resulta claro que este modelo presenta un desempeño menor al de CAMS, que de por sí no es la mejor opción satelital para la región bajo estudio. Esto se debe a que el portal CAMS utiliza imágenes del satélite Meteosat como entrada al modelo Heliosat-4, que tiene un elevado ángulo de visión sobre la Pampa Húmeda. La comparación hecha aquí ubica al GOES-DSR como una alternativa satelital de desempeño inferior a otras alternativas satelitales disponibles en la región, pero mejor que datos de reanálisis de modelos numéricos de atmósfera como MERRA2.

AGRADECIMIENTOS

Los coautores del Laboratorio de Energía Solar agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), Udelar, por el apoyo financiero a través de su programa de Grupos de I+D.

REFERENCIAS

- Abal, G., Aicardi, D., Suárez, R. A., y Laguarda, A. (2017). Performance of empirical models for diffuse fraction in uruguay. *Solar Energy*, 141:166–181.
- Fillmore, D., Rutan, D., Kato, S., Rose, F., y Caldwell, T. (2022). Evaluation of aerosol optical depths and clear-sky radiative fluxes of the CERES Edition 4.1 SYN1deg data product. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(15):10115–10137.
- Fu, Q. y Liou, K. N. (1993). Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 50(13):2008 – 2025.
- Gallegos, H. G. y Lopardo, R. (1988). Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the argentine pampa humeda. *Solar Energy*, 40(5):397–404.
- Gonzalez, J., Teixeira-Branco, V., y Alonso-Suárez, R. (2019). Evaluation of the Heliosat-4 and FLASHFlux models for solar global daily irradiation estimate in Uruguay. En *ISES Conf. Proceedings, Solar World Congress*. URL: <https://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0197-TeixeiraAlvesBranco.pdf>.
- Iturbide, P., Alonso-Suarez, R., y Ronchetti, F. (2023). An analysis of satellite-based machine learning

- models to estimate global solar irradiance at a horizontal plane. En Naiouf, M., Rucci, E., Chichizola, F., y De Giusti, L., editores, *Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics*, pp. 118–128, Cham. Springer Nature Switzerland.
- Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted cams database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the pampa húmeda. *Solar Energy*, 199:295–307.
- Laguarda, A., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M., Luza, S., Burgos, B., Stern, V., y Alonso-Suárez, R. (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 48:1–9.
- Laszlo, I., Kim, H.-Y., y Liu, H. (2020). *Algorithm Theoretical Basis Document For Downward Shortwave Radiation (Surface), and Reflected Shortwave Radiation (TOA), Enterprise Processing System (EPS) Version*. NOAA/NESDIS/STAR.
- Li, R., Wang, D., Wang, W., y Nemani, R. (2023). A GeoNEX-based high-spatiotemporal-resolution product of land surface downward shortwave radiation and photosynthetically active radiation. *Earth System Science Data*, 15(3):1419–1436.
- McMahan, A., Grover, C., y Vignola, F. (2013). Evaluation of resource risk in solar-project financing. En Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 81–95. Academic Press, Boston.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11:1633–1644.
- Perez, R., Ineiche, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., y Vignola, R. G. F. (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances: Description and validation. *Solar Energy*, 73:307–317.
- Perez, R., Seals, R., y Zelenka, A. (1997). Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, 60(2):89–96.
- Pinker, R. T. y Laszlo, I. (1992). Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 31(2):194 – 211.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, C., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., y Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: the Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57.
- Rigollier, C., Bauer, O., y Ward, L. (2000). On the clear sky model of the esra– european solar radiation atlas– with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, p. 33–48.
- Rutan, D., Kato, S., Doelling, D., Rose, F., Nguyen, L., Caldwell, T., y Loeb, N. (2015). CERES synoptic product: Methodology and validation of surface radiant flux. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(6):1121 – 1143.
- Sarazola, I., Laguarda, A., Ceballos, J. C., y Alonso-Suárez, R. (2023). Benchmarking of modeled solar irradiation data in uruguay at a daily time scale. *IEEE Latin American Transactions*, 21(9):1040–1048.
- Schnitzer, M., Thuman, C., y Johnson, P. (2012). The impact of solar uncertainty on project financeability: mitigating energy risk through on-site monitoring. En *Proceedings of the American Solar Energy Society (ASES)*, pp. 1–5, Denver, Colorado, United States.
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., y Renné, D. (1999). Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, 62(3):199–207.

EVALUATION OF THE GLOBAL SOLAR IRRADIANCE MODEL DSR FROM GOES-16 IN URUGUAY

ABSTRACT: Solar resource information is essential for the development of solar energy applications. In the absence of quality ground measurements or satellite estimates with locally adapted models, users tend to rely on the available databases. These databases are usually composed of generic satellite-based estimates or atmospheric modeling data that do not always achieve adequate performance. Knowing the performance of such tools is therefore important to better advise solar sector's users. This study evaluates for the first time in Uruguay the performance of the GOES-16 solar global horizontal irradiance (DSR) product developed by NESDIS/NOAA. The Heliosat-4 model, long evaluated in this region, is included in the analysis as a reference. The comparison shows that the GOES-DSR product does not outperform in the region the Heliosat-4 estimates, with a relative RMSE of $\sim 19-20\%$, a standard deviation of $\sim 95\text{ W/m}^2$ and a relative MBE of $\sim +3\%$ compared to the Heliosat-4's RMSE of 17-18%, STD of 70 W/m^2 , and MBE of -1.5% . The Heliosat-4 metrics are consistent with previous evaluations in Uruguay.

Keywords: solar irradiance, GHI, satellite-based estimation, Uruguay, GOES-DSR, Heliosat-4

LA EDUCACIÓN EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA. CARRERAS DE NIVEL SUPERIOR UNIVERSITARIO Y NO UNIVERSITARIO CON TEMÁTICA ENERGÉTICA DIRIGIDAS A DOCENTES

Carlos Mora Fresca^{1,2,3}, Alberto Balegno Mazzini⁴

¹Departamento de Planificación Estratégica, Gerencia Planificación, Regional Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Godoy Cruz, Mendoza

²Escuela Técnica Ingeniero Álvarez Condarco, Godoy Cruz, Mendoza

³CCT Dr. Samuel Ostropolsky, Mendoza, Mendoza

⁴Escuela Normal Superior N° 1 en Lenguas Vivas Presidente Roque Sáenz Peña, CABA.

email: carlosmorafresca@cnea.gob.ar, alberto.balegno@bue.edu.ar

RESUMEN: Este artículo tiene como objetivo presentar el rol que desempeña la educación en la transición energética. Para ello se presenta una primera definición de este último concepto y se plantea la necesidad de encararla de forma urgente como una transición energética intencionada (*purposive transition*), con el fin de disminuir las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Se enumeran los aspectos principales que tienen potencial de contribuir con la transición energética, haciendo énfasis en aquellas en donde puede considerarse a la educación formal e informal como un factor determinante para diseñar e implementar medidas. Adicionalmente se hace un relevamiento de las carreras de grado y posgrado con temáticas ambientales y energéticas, así como el marco legal asociado a la implementación de la educación energética en Argentina. Se discute sobre cómo debe ser la transposición didáctica de estos saberes energéticos para ser enseñados en el aula y cuales profesionales serían los idóneos para transmitir estos conocimientos. Finalmente se plantea la necesidad de modificar planes de estudio de las carreras de profesorado y licenciaturas a fin de incluir entre los alcances de los títulos (incumbencias) a la educación energética como una facultad adicional al título profesional.

Palabras clave: transición energética, educación energética, transposición didáctica.

INTRODUCCIÓN

A finales de 2020 y mediados de 2021 fueron sancionadas las leyes 27592 (Ley Yolanda) y 27621 (Ley de Educación Ambiental Integral) las cuales tienen como finalidad garantizar la formación integral en cuidado del ambiente y desarrollo sostenible con el fin de generar en la ciudadanía una conciencia ambiental tanto para personas que se desempeñan en la función pública (Ley Yolanda) como para estudiantes de los diferentes niveles formales de educación (Ley de Educación Ambiental Integral). Para poder implementar ambas leyes es necesario contar con una articulación entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Educación de la Nación, quienes son las autoridades de aplicación de dichas leyes, con el fin de coordinar de forma eficiente las acciones para seleccionar contenidos y estrategias de enseñanza dirigida a públicos diferentes: alumnos, docentes y funcionarios públicos. La ley 27621 prevé en su artículo 20 que: la educación ambiental debe incorporarse en todos los niveles y modalidades del sistema educativo; que deben formularse programas nacionales de educación ambiental en el ámbito de la formación docente; que se debe brindar capacitación y asistencia técnica a los agentes de la administración pública de las distintas jurisdicciones. En este sentido, una pregunta que surge de manera natural es si actualmente se cuenta con los recursos humanos idóneos para

llevar a cabo la implementación de ambas leyes. Antes de responder a estas preguntas, es necesario definir qué es la transición energética y plantear una metodología que permita hacer un relevamiento de la oferta educativa existente en esta temática a fin de evaluar si el sistema educativo puede dar respuesta a la demanda de profesores para formación de docentes que impartan estos conocimientos al aula en los distintos niveles de la educación formal y la ciudadanía en general, empezando por los funcionarios de la administración pública (Ley Yolanda).

TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La forma en que la especie humana usa la energía siempre ha implicado mejorar los procesos de conversión de los recursos a energía final, es así como, por ejemplo, el proceso de bipedestación implicó utilizar 25% menos de energía en comparación al resto de los cuadrúpedos. Además de ello, los humanos son la única especie del planeta que, a lo largo del tiempo, además de la energía de los alimentos y del Sol, ha ido incorporando otras formas de energía para mejorar su calidad de vida. Primero logró dominar el fuego empleando biomasa para cocinar alimentos, tener iluminación nocturna y calor en el invierno. Luego usó animales para arar la tierra y poder cultivar alimentos, inventó la rueda para mejorar la transmisión de energía, minimizando las pérdidas por roce. Por otra parte, empleó energía eólica para las velas de los barcos, como también energía hidráulica para molinos y energía solar para diversos usos como secar granos. La Figura 1 muestra esta serie temporal.

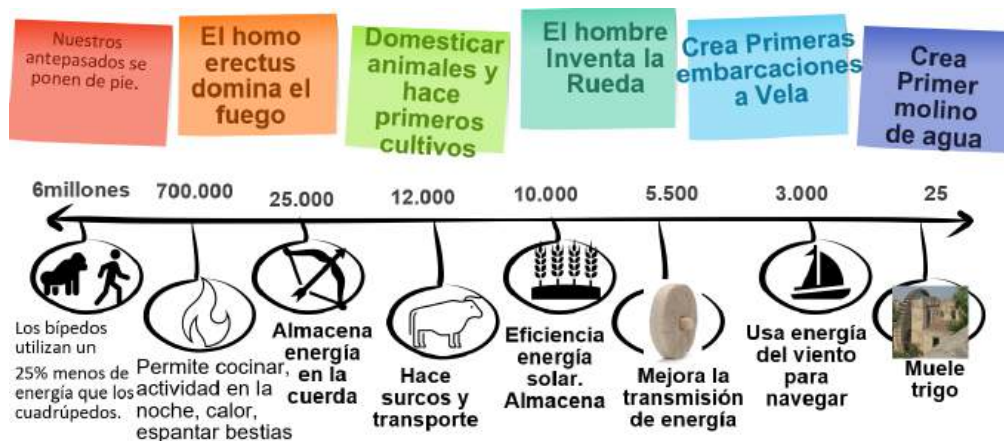


Figura 1. Línea de Tiempo Hitos de la Energía años Antes de Cristo. Elaboración Propia.

Es importante destacar que además de dominar recursos, la especie humana ha sido capaz de inventar tecnologías que permiten optimizar su uso. Estos inventos van desde molinos impulsados por la fuerza del viento hasta máquinas de vapor que emplearon carbón mineral. Dominó el almacenamiento de energía química en dispositivos (pilas) para usar como energía eléctrica y entendió los procesos de transformación y conservación de la energía que llevaron a establecer las leyes de la termodinámica y el electromagnetismo (línea de tiempo desde 600 DC hasta mediados de 1800. Figura 2). Se destacan como hitos: el primer pozo de petróleo moderno y gas natural asociado, 1859 en Pensilvania, Estados Unidos. Este nuevo recurso energético permitió contar con nuevos fósiles combustibles cuyos derivados cobran especial importancia en el siglo XX por su uso tanto en calderas para producir calor y electricidad como en motores de combustión de maquinarias, autos, barcos y aviones, permitiendo desarrollar la sociedad moderna y dependiente de la energía que hoy en día conocemos. Tal puede llegar a ser la dependencia de un recurso que, si no lo tiene, un país entra en guerra con otro por el control de los yacimientos. Otro hito importante para destacar es el aprovechamiento de la energía a partir de la fisión nuclear a mediados de la década de 1950. Se aprovecha el calor generado en reacciones nucleares para producir energía eléctrica. Todos estos cambios en la oferta, forma de transformación y demanda de energía es lo que se conoce como **transición energética**.

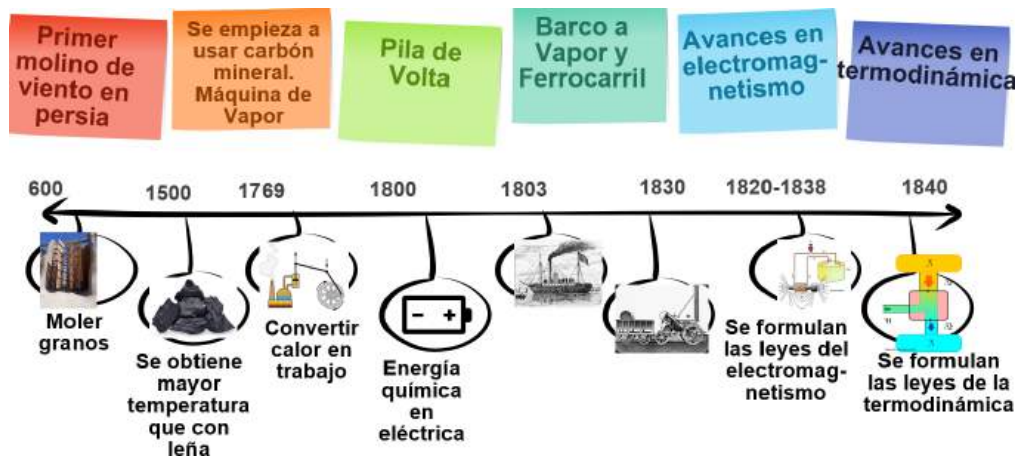


Figura 2. Línea de Tiempo Hitos de la Energía años Después de Cristo. Elaboración Propia.

Pero la quema intensiva de combustibles fósiles emite a la atmósfera diferentes gases (principalmente CO₂), y parte de la radiación que recibimos del Sol quede retenida en la atmósfera, causando el aumento de la temperatura que se conoce como efecto invernadero. En la Figura 3a) se muestra esta correlación entre la concentración de CO₂ y la temperatura media de la Tierra y en la Figura 3b) el consumo de energía primaria e hitos importantes de la energía.

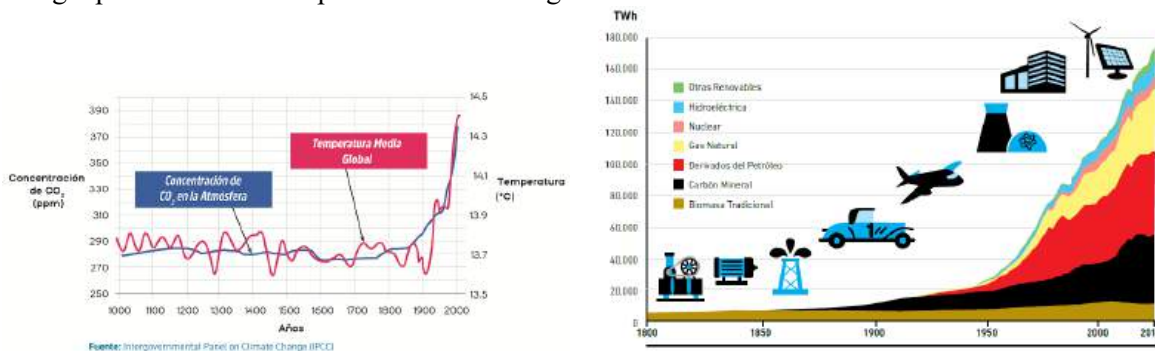


Figura 3a. Concentración de Co₂ vs. Temperatura media global en función del tiempo. Fuente IPCC.
 Figura 3b. Hitos de la Energía. Elaboración Propia.

El aumento de la temperatura empezó a causar preocupación y es así como cuatro autores alemanes, escriben en 1980 el artículo “*Growth and prosperity without oil and uranium*. Krause *et al.* acuñan por primera vez el término transición energética (*Energiewende*), proponiendo el uso de energías renovables para sustituir a los combustibles fósiles y la energía nuclear.

Actualmente, el término transición energética es ampliamente usado y difiere mucho del planteado inicialmente por Krause. La principal diferencia es que la generación nuclear fue incluida en 2022 por el parlamento europeo dentro de la taxonomía sobre mitigación y adaptación como una actividad ambientalmente sostenible de transición hacia una economía baja en emisiones de carbono.

Entre los autores que más han escrito sobre transición energética se encuentra el checoslovaco-canadiense Václav Smil quien ha escrito 36 libros y muchos artículos, en los que se plantea como **objetivo de la transición energética: Reducir las emisiones de CO₂ equivalentes y cumplir con las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDC’s por sus siglas en inglés) a fin de limitar el calentamiento global 1,5 °C al año 2050, meta establecida en el acuerdo de París (AP) de 2015.** Otros, como Rosenow *et al.* (2017) definen a la transición energética como **un cambio estructural de la forma en la cual los recursos energéticos son producidos, transformados y utilizados.** En este sentido, puede pensarse que una transición energética se refiere a cambios en la **composición de la**

oferta energética (migrar de biomasa a carbón mineral y luego al petróleo y gas natural, aprovechamiento de biocombustibles), o a cambios en **las tecnologías asociadas a los procesos de transformación de recursos energéticos** en formas de energía intermedia o final o variaciones en **la forma en la cual se consume la energía**, asociada a cambios tecnológicos o de comportamiento (cambios en la forma como nos trasladamos, cocinamos y obtenemos calor).

Transición Energética intencionada

A diferencia de las transiciones energéticas que han ocurrido en el pasado, la actual se debe desarrollar como una transición intencionada (*purposive transition*), fundada en la necesidad de disminuir las emisiones de GEI con el fin de limitar el calentamiento global.

Todos los países signatarios de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) desde 1992 se han comprometido a llevar a cabo acciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a niveles previos a la firma en 2015 del Acuerdo de París.

Argentina ha suscripto a lo largo del tiempo diferentes acuerdos multilaterales referentes al cambio climático y así mismo ha elaborado leyes propias (Fig. 4 Línea de tiempo de los acuerdos argentinos).



Figura 4. Línea de tiempo de acuerdos firmados por Argentina sobre cambio climático. Elaboración propia con información de SGyDS. 2019.

Disminuir las emisiones de GEI no es una tarea fácil puesto que somos una sociedad que cada vez demanda más energía bien sea por el aumento de la población o por mejoras en la calidad de vida que se ven reflejadas en el nivel de economía de un país (por ejemplo, en el producto bruto interno PBI). Es así como la Agencia Internacional de Energía (IEA) ha publicado en 2019 escenarios de proyección de demanda en donde se contempla el aumento de la demanda debido a la población y al aumento del PBI. Incluye una hoja de ruta con 400 hitos para disminuir la demanda en base a programas de uso racional y eficiente de la energía. La Figura 5 resumen 3 escenarios (tendencia actual, escenarios intermedios y escenario de desarrollo sustentable NetZero). Un análisis similar fue realizado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), que reconoce tres aspectos fundamentales de la actual transición energética: promoción de la eficiencia energética, expansión de las energías renovables y sustitución de combustibles fósiles por electrificación, cada uno con igual participación. Ambos documentos - IEA e IRENA - expresan que la promoción de la eficiencia energética debe ir de la mano de programas integrales de educación en todos los niveles del sistema de enseñanza formal y no formal, así como campañas de concientización del uso racional y eficiente de la energía. En la Figura 6 se muestra el consumo de energía primaria de 2020 y la proyección a 2040, crecimiento de la demanda y potencial de ahorro con mejoras en el uso racional y eficiente de la energía.

En cuanto a la expansión de energías renovables, se debe trabajar en la incorporación de todas las formas posibles de energías alternativas que permitan diversificar la matriz energética a fin de disminuir la dependencia de combustibles fósiles. Se pueden mencionar: la solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, biocombustibles, geotérmica, entre otras.

Finalmente, es importante destacar que el gas natural por su bajo factor de emisión, menores precios y mayor versatilidad para todo tipo de usos térmicos y hasta de movilidad, viene absorbiendo en las últimas décadas parte de los aumentos de demanda del carbón mineral, petróleo y sus derivados líquidos. Por ello, en algunos países, se considera este recurso energético como un puente hacia la descarbonización, para dar tiempo a las sociedades de incorporar, mientras tanto, la cantidad de energías no emisoras de GEI necesarias para la eliminación de los combustibles más contaminantes.

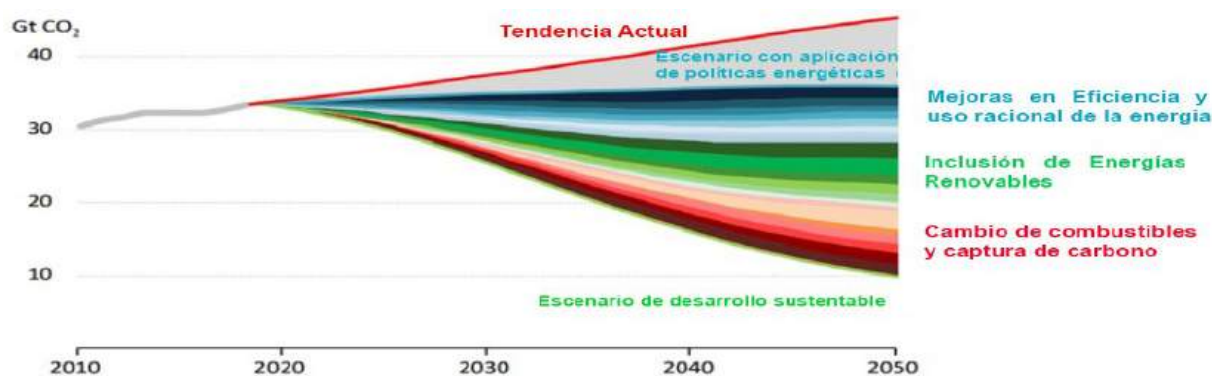


Figura 5. Escenarios de emisión de GEI. Fuente IEA, 2019.

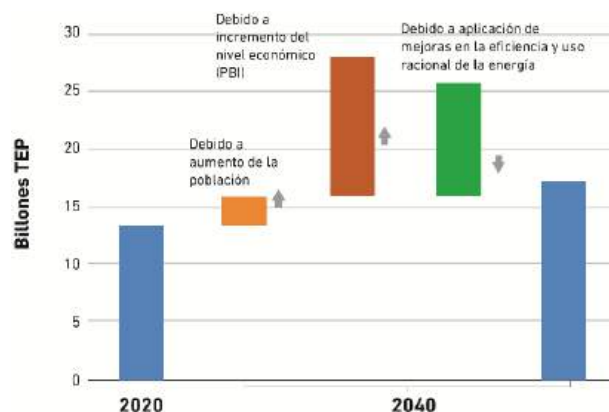


Figura 6. Consumo de Energía Primaria 2020 y Proyección a 2040. Fuente IEA, 2019.

La estrategia de transición en Argentina

La República Argentina no es ajena a todo lo que pasa a nivel mundial y en el marco de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de la ONU sobre Cambio Climático - COP 22 - celebrada en noviembre de 2016 en Marruecos, nuestro país se comprometió con una meta absoluta para no exceder la emisión neta de 483 MtCO₂e para el año 2030. En diciembre de 2020, se presentó una nueva meta, más ambiciosa que la original, que consiste en reducir el 27,7% de las emisiones respecto de la NDC (siglas en inglés de *Nationally determined contribution*) de 2016. De esta forma, fijó una meta absoluta e incondicional aplicable a todos los sectores de la economía que implica no exceder la emisión neta de 349 MtCO₂e para el año 2030.

En octubre de 2021, mediante la resolución 1036 de la Secretaría de Energía se aprueba el documento *Lineamientos para un Plan de Transición Energética al 2030*, donde se plantean escenarios y acciones a 2030 en los sectores electricidad, gas natural y transporte. Entre las acciones a implementar se incluyen políticas de adopción de energías renovables, mayor penetración de gas natural y uso de energía eléctrica en usos finales de la energía; reconocen además a la eficiencia energética como una vía para disminuir las emisiones de GEI, además tienen en cuenta que existen barreras de implementación y limitaciones, entre las que destacan en el sector residencial (responsable del 16,6% de las emisiones totales de GEI en 2018, Fuente IBA 3 2019, SGAYDS):

- Educación y concientización: el usuario no lo considera importante.
- Económicas: las opciones de artefactos o materiales energéticamente más eficientes son demasiado costosas en comparación con las tradicionales.
- Etiquetas de eficiencia energética difíciles de comprender y comparar.

Es decir que si se quiere encarar una transición energética se debe partir de un cambio cultural en el uso racional y eficiente de los recursos y que no se puede hablar de transición si no se habla primero de

ahorro, eficiencia y **educación energética**. Pero, al realizar una revisión de los planes de estudio de los diferentes niveles del sistema educativo, se observa que no existe una asignatura con el nombre de *Educación Energética*, sin embargo, se puede destacar que estos contenidos se encuentran de una forma “tímida” dentro de la **educación ambiental**.

EDUCACIÓN AMBIENTAL EN ARGENTINA

La educación ambiental en Argentina cuenta con un sólido marco normativo respaldado por la Constitución Nacional, en su artículo 41 y leyes relacionadas con el ambiente, entre ellas:

- Ley 25675 Política Ambiental Nacional, promulgada el 27 de noviembre de 2022.
- Ley 26206 de Educación Nacional, promulgada el 27 de diciembre de 2006.
- Ley 27592 Yolanda, promulgada el 14 de diciembre de 2020.
- Ley 27621 para la implementación de la Educación Ambiental Integral, promulgada el 1 de junio de 2021.

En la Ley 25675 de Política Ambiental Nacional también conocida como Ley General del Ambiente, se menciona a la educación ambiental de forma explícita en sus artículos 2 inciso h); 8 numeral 4; artículos 14 y 15 donde se reconoce a la educación ambiental como un proceso continuo y permanente que sirva de instrumento para generar en los ciudadanos el desarrollo de conciencia ambiental.

En el caso de la Ley de Educación Nacional, su artículo 89 expresa que el Ministerio de Educación de la Nación dispondrá las medidas necesarias para proveer la educación ambiental en todos los niveles y modalidades del Sistema Educativo Nacional y la capacitación a los docentes en esta temática. Además, en el artículo 92 inciso g, se reconoce como contenido curricular común a todas las jurisdicciones a “*La toma de conciencia de la importancia del ambiente, la biodiversidad y los recursos naturales, su respeto, conservación y preservación*”.

Es importante destacar dos leyes fundamentales para promover la educación ambiental: la Ley 27592 Yolanda y la Ley 27621 para la implementación de la educación ambiental integral.

La Ley Yolanda tiene como objetivo garantizar la formación integral en ambiente para las personas que se desempeñen en la función pública, enfocándose en el desarrollo sostenible y con énfasis en el cambio climático. Esta ley rinde homenaje a Yolanda Ortiz, una destacada figura ambiental de Argentina y América Latina, reconocida por su labor en la protección del medio ambiente. En su Artículo 2 establece que la capacitación en temáticas ambientales, con enfoque en el desarrollo sostenible y especial énfasis en cambio climático, es obligatoria para todas las personas que trabajan en la función pública a nivel nacional. Esto busca promover una conciencia ambiental y compromiso con el cuidado del entorno en todos los niveles y jerarquías de la administración pública.

Por otro lado, la Ley 27621 tiene como propósito establecer el derecho a la educación ambiental integral como política de educación pública en Argentina buscando la sostenibilidad y continuidad en la gestión permanente de la educación ambiental. La ley busca promover la educación ambiental en toda la sociedad y garantizar la cobertura territorial, social y sectorial, trabajando conjuntamente con mecanismos de concertación social e interinstitucional. Esta ley trasciende lo individual en busca de una mirada educativa integral y holística de los sujetos buscando dar respuesta a problemas complejos.

Entre los objetivos de la Ley 27621, se encuentra el de generar mecanismos para facilitar el cumplimiento sistemático de la Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Para ello, se prioriza la incorporación y gestión transversal de la educación ambiental en todos los niveles y modalidades del sistema educativo nacional, así como la capacitación y asistencia técnica para los agentes de la administración pública.

Educación energética

En cuanto a la educación energética, el Artículo 5 de la Ley Yolanda destaca la importancia de la información referida a la eficiencia energética y a las energías renovables en los lineamientos generales de la formación integral en ambiente. **Esto implica promover la enseñanza sobre prácticas de uso eficiente de la energía y la adopción de fuentes de energía renovable y sostenible, como parte esencial de la educación ambiental integral.**

Es posible plantearse los siguientes interrogantes ¿Quién debe enseñar educación ambiental y energética? ¿Existen carreras orientadas a docentes en las que se abarquen estas temáticas?

METODOLOGÍA DE RELEVAMIENTO

Con el fin de realizar un relevamiento de las carreras de formación de docentes que tengan temática ambiental y energética, es necesario hacer un repaso rápido del sistema educativo de nivel superior.

El sistema de educación superior en Argentina se compone de dos subsistemas claramente diferenciados:

- **Educación Superior No Universitaria:** Representado por las Escuelas Normales, Institutos Superiores de Formación Docente (ISFD) e Institutos Superiores de Formación Técnica (ISFT). Su propósito principal es la formación de maestros y profesores para los niveles educativos inferiores, como el inicial, primario y secundario, así como técnicos superiores. Para dar clases en este nivel se requiere contar con un título de profesor más: a) un título de profesor de educación superior, b) un postítulo, c) un ciclo de licenciatura.
- **Educación Superior Universitaria:** Integrada por las universidades e institutos universitarios. Aquí se forman profesionales de diversas áreas del saber, como arquitectos, contadores, ingenieros, médicos, entre otros. Se considera una carrera de grado universitario aquellas cuya duración es de 4 años y 2600 horas reloj. En cuanto a las carreras de posgrado, su marco regulatorio está establecido por la Resolución Ministerial RM 160/2011, otorgando títulos académicos como especialización, maestría y doctorado. Estos títulos de posgrado no habilitan a nuevas actividades profesionales, es decir, no otorgan nuevas incumbencias.

En el caso de los títulos emitidos por el subsistema de educación superior no universitaria se totalizan 1348 establecimientos educativos, y en la mayoría de los casos cuentan con validez jurisdiccional. Esto hace que no exista una única base de datos para realizar la búsqueda de carreras. Por lo que para el caso de este estudio solo se hace el relevamiento de este tipo de títulos emitidos en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires – CABA-. .

Para el caso de títulos emitidos por el subsistema de educación superior universitaria que cuentan con validez nacional otorgada por el Ministerio de Educación y que incluye a todas las universidades nacionales, provinciales, privadas e internacionales se puede consultar el buscador de títulos oficiales universitarios de la Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación (SPU) : https://sipes.siu.edu.ar/buscar_titulos_form.php . Al hacer un relevamiento, en este sitio web, se observa la siguiente oferta:

Tabla 1: Relevamiento de carreras con temática de educación ambiental.

Título	Institución	Res. Min. de reconoc. oficial
Licenciado en Educación Ambiental - Ciclo de Licenciatura	Universidad Nacional de Cuyo	R.M.1233/04 (discontinuada)
Licenciado en Enseñanza de Ciencias del Ambiente - Ciclo de Licenciatura	Universidad Tecnológica Nacional - FR San Francisco	R.M.0224/10 (discontinuada)
Profesor/a de Enseñanza Secundaria y	Universidad de Buenos Aires	R.M./738/2022

Superior en Ciencias Ambientales		
Especialización y Maestría en Ambiente y Desarrollo Sustentable, Orientación Educación Ambiental	Universidad Nacional de Quilmes	R.M./517/2021 R.M./3069/2015 (a distancia)
Magíster en Educación Ambiental	Universidad Nacional de Mar del Plata	R.M./3690/2021

Como se observa en la Tabla 1 existen solo 3 títulos de grado (de los cuales dos se encuentran discontinuadas) y la otra es una carrera de reciente creación (2022) sobre la base de una Licenciatura en Ciencias Ambientales dentro de una Facultad de Agronomía. En el caso de las carreras de posgrado se observan solo 2 titulaciones que también son de reciente creación. Al analizar los diferentes planes de estudios se advierte que dichas carreras están enfocadas a temas de contaminación e impacto ambiental de diversas actividades humanas y no se menciona explícitamente a la educación energética.

En este estudio interesa hacer notar que no es que no existan carreras que traten temas energéticos, sino que no existen carreras de formación docente referidas a educación ambiental y energética.

Al ampliar la búsqueda de carreras, sin considerar que sean enfocadas a docentes es posible encontrar:

- 11 tecnicaturas que incluyen en la denominación algún vocablo relacionado con energía
- 6 licenciaturas y 2 carreras de ingenierías en temas específicos de energía
- 8 carreras de especialización con orientación en temas de energía
- 10 maestrías en temáticas energéticas y 3 doctorados en energías renovables

Al analizar los alcances de los títulos de tecnicaturas y carreras de grado se observa que están orientados a la formación en temas técnicos (realizar instalaciones, analizar, evaluar y/o investigar) y no hacen referencia explícita a la docencia.

Situación similar ocurre cuando se analizan las condiciones de admisión de los diferentes posgrados. Se observa que los mismos están dirigidos a profesionales de especialidades diversas como: ingenieros, economistas, físicos, químicos, abogados, etc. pero no a docentes.

Luego de este primer relevamiento se puede discernir que no existen profesores/as o licenciados/as con títulos explícitos de educación energética. Las carreras de grado universitario existentes con temáticas energéticas tienen un enfoque profesional muy específico no orientado a la docencia. Por su parte, las carreras de posgrado no están dirigidas a docentes egresados de terciarios y que se desempeñen, por ejemplo, en el nivel medio del sistema educativo formal. Esta condición muestra las escasas posibilidades de formación docente en el tema energético.

Es decir, el sistema educativo requiere de profesionales de la docencia que cuenten con una sólida formación pedagógica y didáctica, debidamente contextualizada en el ámbito de la realidad educativa de la Argentina y que dominen la disciplina energética a fin de cubrir las nuevas materias que sean creadas, por ejemplo, en el nivel secundario, en orientaciones de energía y sustentabilidad.

Es necesario diseñar carreras que tengan en cuenta los conocimientos y saberes técnicos energéticos de primera fuente pero que estos saberes sean accesibles en la formación docentes y luego a los alumnos de los diversos niveles del sistema educativo. Este proceso de convertir el objeto del saber o saber erudito en objeto de enseñanza fue definido por Chevallard en 1985 como *transposición didáctica*.

Al momento de crear una carrera cada universidad tiene libertad para diseñar el plan de estudio teniendo en cuenta la modalidad de cursada, años y horas mínimas que establece la RM 6/1997. En este sentido, puede darse el caso de carreras con la misma formación disciplinar que tengan planes de estudios distintos, sobre todo en aquellas carreras que no estén incluidas en la nómina del artículo 43 de la Ley de Educación Superior. De esta forma al comparar la carrera de Profesor en Enseñanza media y Superior en Física de una universidad tradicional y enciclopédica como es la UBA, no tiene materias donde se contextualice los procesos de transformación de la energía y su impacto en el ambiente de forma pragmática como si ocurre en las carreras de ingeniería. En contraste el Profesorado en Disciplinas Industriales Especialidad Física y Física Aplicada de la UTN (Universidad Tecnológica Nacional), tiene una materia llamada Energotécnica en el tercer año que cubre estas temáticas. Situación similar ocurre

con la materia Física Ambiental del Profesorado en Física (optativa para la licenciatura) de la Universidad Nacional de Salta.

Diseños Curriculares y Planes de Estudio Orientados en Energía para el nivel Secundario

El Consejo Federal de Educación (CFE) reconoce la importancia de la educación energética y es por ello por lo que mediante Resolución CFE 356/2019 crean, el marco de referencia de educación secundaria orientada, cuyo título a otorgar sea: Bachiller en Energía y Sustentabilidad. Si bien es una orientación nueva que todavía no ha sido implementada, algunas jurisdicciones han trabajado en los diseños curriculares con el fin de brindar esta nueva oferta educativa.

Se pueden mencionar los casos de la provincia de Jujuy y de CABA, quienes mediante Resoluciones 182/2019 y 2370/2022 respectivamente aprueban el diseño curricular del Bachiller Orientado en Energía y Sustentabilidad. Los espacios curriculares de CABA de esta orientación son:

Tabla 2: Materias Específicas: Bachiller en Energía y Sustentabilidad. Fuente: Diseño curricular CABA

Año	Espacio Curricular	Horas Semanales
3ro	Taller de Modelización en Producción de Energía y Consumo	4
4to	Observatorio de participación ciudadana en Energía y Calidad de Vida	3
4to	Taller de modelización en Cuidado del Ambiente, ciencia y tecnología	4
4to	Seminario de Políticas en Energía, ciencia y Tecnología	2
5to	Taller de Modelización en recursos Energéticos, ciencia y tecnología	4
5to	Obs. de particip. ciudadana en Matriz energética y leyes ambientales	4
5to	Proyecto: Consumidores y Productores	4
5to	Historia Orientada: evolución de la Matriz Energética	2
5to	Tecnologías de la Información orientada: Ciencia de datos	2

Vale destacar que estos espacios curriculares son nuevos y únicos (no existen en otras orientaciones). Una interrogante que surge de forma natural es: ¿Qué docentes tienen títulos habilitantes para dictar esas materias? Al realizar la consulta a la comisión de títulos la respuesta obtenida es que han elaborado los listados de títulos que habilitan al dictado de cada una de las nuevas materias.

Al analizar estos listados se observa que pareciera que, los criterios han sido amplios de modo tal que hay títulos con orientación en ciencias sociales que van desde abogados, sociólogos, profesores de historia, hasta títulos con orientaciones más cercanas a lo técnico-científicos, como profesor de física, química, educación ambiental, etc.

Es cierto que son materias nuevas y existe la necesidad de cubrirlas, y el sistema educativo tiene que dar respuesta a esta nueva demanda de profesores. Para ello, se considera necesario plantear la necesidad de crear desde cero una carrera de profesor en educación energética o reconvertir (previsto en el artículo 38 de la Ley de Educación superior) por ejemplo a profesores de física (ya graduados) para que puedan estar habilitados a efectivamente dictar estas nuevas materias.

Existe un antecedente de creación de nuevas carreras en temática energética sobre la base de un profesorado en física en la Universidad Nacional de Salta. Es así como el grupo de investigación en Energía Solar de la Facultad de Ciencias Exactas crea en el año 1984 la Licenciatura en Física con orientación en Energías Renovables (ER). Luego en 1997 esta Licenciatura en Física con orientación energética permite la creación de la Licenciatura en Energías Renovables. Situación similar sucede con el doctorado en física creado en 1990 el cual se reemplaza en el año 1998 por el Doctorado en Ciencias: Área Energías Renovables y desde esa misma fecha se crean las carreras de Especialización y la Maestría en ER. La conjunción del dictado de estas carreras de grado y postgrado en el área de las ER y de las carreras relacionadas con la Formación de Profesores da cuenta de la consolidación de docentes investigadores en el área de las ER, pero también en el área de la Educación en Ciencias (Javi V., 2013).

Por lo anterior, resulta interesante hacer un análisis rápido del sistema educativo superior y ver qué requisitos se deberían cumplir para crear una carrera de profesor en educación energética o reconvertir una ya existente tal como está previsto en la Ley de Educación Superior en su artículo 38, por ejemplo

reconociendo equivalencias entre carreras de una misma universidad o articulando entre diferentes universidades a través de un ciclo de complementación curricular dirigido a profesores de física.

Situación Actual de Cursos de Educación Energética

Si bien no existen carreras de grado de educación energética, sí es posible encontrar cursos dirigidos a docentes en los que se abordan temas de cambio climático, educación ambiental, eficiencia energética, matriz energética, usos cotidianos de la energía nuclear y energías renovables.

Es posible mencionar los siguientes cursos y/o portales educativos:

- Curso ABC de la Energía Nuclear, 60 horas. Instituto Dan Beninson, Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional San Martín. Otorga Puntaje en PBA.
- Aplicaciones de la Energía Nuclear en la Vida Cotidiana, 60 horas. Instituto Nacional de Formación Docente, Comisión Nacional de Energía Atómica. Otorga Puntaje .
- Diplomatura Internacional en Cambio en Climático. Organizado por el Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (3iA) de la Universidad Nacional de San Martín. Aún no otorga puntaje.
- Especialización docente en Cambio Climático y Energía Renovables. Instituto Superior Gladys Raquel Vera. (discontinuado). Validez en CABA, otorga puntaje.
- Especialización docente en educación ambiental Instituto Superior Gladys Raquel Vera (virtual). Validez nacional, otorga puntaje en CABA.
- Especialización Docente de Nivel Superior en Educación Energética con enfoque en Energías Renovables. Instituto Superior General Martín M. de Güemes. Validez CABA. No publicitado.

Estos cursos, si bien permiten actualizar a los docentes en temas de energía, no habilitan a docentes a tomar horas de las nuevas materias en el marco del Plan del Bachiller en Energía y sustentabilidad. Los mismos otorgan puntaje como cursos, pero no constituyen títulos base.

Esto tiene su explicación legal en el Artículo 42 de la Ley de Educación Superior, donde se establece que las Universidades son las que definen las incumbencias profesionales de los títulos que emiten y las provincias (en el caso de Educación, las juntas de clasificación de méritos docentes) tienen el poder de policía para verificar las incumbencias de los títulos. La educación ambiental es una nueva dimensión, que no estaba prevista en las incumbencias de los títulos aprobados antes de la ley 27621.

Es por ello que cuando se deba tramitar el reconocimiento oficial de nuevos títulos se deben incluir, en el plan de estudios materias con temáticas ambientales/energéticas y explicitar en los alcances profesionales de la carrera que el título habilita a la enseñanza de educación ambiental y energética.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El cambio climático implica que se deban llevar a cabo acciones con el fin de limitar a 1,5 °C el aumento de temperatura media global. A nivel mundial se han elaborado escenarios en los que se plantean diferentes hojas de ruta para conseguir disminuir las emisiones de GEI para 2050.

Las diferentes acciones que hay que llevar a cabo implican por una parte cambiar la forma en que usamos los recursos energéticos, bien sea sustituyendo los combustibles por otros cuya huella de carbono cause un menor impacto en el ambiente (principalmente se promueve el uso de energías renovables, incluida la oferta de recursos no convencionales y se plantea como solución puente la sustitución de carbón mineral y combustibles líquidos por gas natural); mientras que por otra parte, las acciones implican desarrollar nuevas tecnologías que sean más eficientes (obteniendo el mismo resultado empleando menos recursos) y finalmente hacer uso racional de la energía (no derrochar).

Para llevar a cabo todas estas acciones, diferentes entidades coinciden en que hace falta educar a los ciudadanos en el cuidado del ambiente, el uso responsable de recursos, es decir, desarrollar una conciencia ambiental. Si se quiere encarar una transición energética se debe partir de un cambio cultural en el uso racional y eficiente de los recursos y que no se puede hablar de transición si no se habla primero

de ahorro, eficiencia y **Educación Energética**. Esto se consigue trabajando sobre la educación formal y es un proceso que debe ser continuo y permanente a través de la educación ambiental y energética.

Es posible ahorrar energía con acciones simples y cambios de hábitos que van desde cerrar la ventana cuando se usa la calefacción o el aire acondicionado; no acelerar o frenar bruscamente cuando se maneja; verificar la presión de aire de las ruedas antes de realizar un viaje para consumir menos combustible; apagar las luces cuando no se necesiten; y otras un poco más elaboradas como pensar en el diseño energéticamente eficiente de una vivienda para aprovechar la luz natural y la climatización.

Argentina muestra su compromiso con la educación ambiental a través de un conjunto de leyes que buscan promover una conciencia ambiental y el desarrollo sostenible en la sociedad. La Ley Yolanda y la Ley 27621 son pilares fundamentales para fomentar la educación integral en ambiente, tanto en el ámbito gubernamental como en la sociedad en su conjunto. Ambas tienen como objetivo proteger el ambiente y construir un futuro más sostenible para las generaciones presentes y futuras, incluyendo la promoción de la educación energética y la adopción de prácticas de eficiencia energética y uso de energías renovables. En este sentido desde el Consejo Federal de Educación en 2019 elaboró el Marco de Referencia y los contenidos mínimos para el Secundario Orientado en Energía y Sustentabilidad.

Sin embargo, al realizar un relevamiento se observa que falta oferta educativa para formación docente (quienes luego son los responsables de transmitir estos conocimientos a sus alumnos) en la temática de educación ambiental con foco en la educación energética y desarrollo sustentable.

Las nuevas materias del bachiller en Energía y Sustentabilidad requieren que sean cubiertas, y el sistema educativo tiene que dar respuesta a esta nueva demanda de profesores. Para ello, se considera necesario plantear la necesidad de crear desde cero una carrera de profesor en educación energética o reconvertir (previsto en el artículo 38 de la Ley de Educación superior) por ejemplo a profesores de física (ya graduados) para que puedan estar habilitados a efectivamente dictar estas nuevas materias.

La poca oferta de educación ambiental que existe se encuentra enfocada a temas de contaminación e impacto ambiental. Por otra parte, la oferta que existe en temas energéticos es súper especializada y no están pensadas para docentes. Es por ello por lo que se debe poner en la agenda educativa la necesidad de crear carreras docentes con temática energética aprovechando la oferta educativa que existe, pero trabajando en la transposición didáctica con el fin de convertir el saber erudito en objeto de enseñanza.

Existen dos formas de hacerlo, crear una carrera desde cero aprovechando alguna carrera similar, como se hizo en la Universidad Nacional de Salta con el profesorado de física y la posterior creación de la carrera de Licenciatura en Energías Renovables. O bien crear una carrera de ciclo de complementación curricular que permita articular una titulación previa y formar, por ejemplo: Licenciados en Enseñanza del Cambio Climático y Educación Energética o Licenciados en Enseñanza de las Energías Renovables con requisito de ingreso: contar con un título de Profesor en Física; La otra alternativa consiste en formar Profesores en disciplinas como: Educación Ambiental, Cambio Climático y Desarrollo Sustentable, Educación Energética, Energías Renovables, con la base de las diferentes tecnicaturas, licenciaturas e ingenierías cuya orientación sea compatible a las ciencias naturales y a las disciplinas de perfil técnico.

En este último caso es posible mencionar que una pequeña modificación (a través de la inclusión de materias que ya forman parte de otras carreras) en el plan de estudios del Profesorado en Disciplinas Industriales (PDI) de la UTN permitiría ampliar las incumbencias del título e incluir a la educación ambiental y energética, dando rápida respuesta a la necesidad de cubrir las materias energéticas. Esta situación está prevista en el artículo 38 de la Ley de educación Superior, que prevé que las universidades deben trabajar en sistemas de equivalencias de materias que permitan la reconversión de carreras.

Vale destacar que el PDI, pertenece al Instituto Nacional Superior del Profesorado Técnico (INSPT), Unidad Académica dependiente de la Universidad Tecnológica Nacional, el cual tiene amplia trayectoria formando docentes con perfil técnico (desde 1964) y tendría alcance federal a través de las 30 facultades regionales de la UTN. Recientemente el Consejo Superior de la UTN mediante ordenanza 1837 creó la carrera Ingeniería en Energía para todo el ámbito de la UTN, y dicha ordenanza prevé que un 30% de las materias pueden ser dictadas a distancia, por lo que los alumnos del PDI (y de cualquier otro profesorado) podrían cursar materias de dicha carrera sin implicar que la universidad destine erogaciones en docentes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la profesora Luisa Izaguirre, docente del Profesorado en Disciplinas Industriales del INSPT de la UTN por la revisión previa de este artículo y a la Dra. Verónica Javi por la motivación para escribir estas líneas.

REFERENCIAS

- Buscador de títulos Oficiales Universitarios. https://sipes.siu.edu.ar/buscar_titulos_form.php
- Leyes Nacionales y Resoluciones Ministeriales en <http://www.infoleg.gob.ar/>
- Secretaría de Energía. (2021). Lineamientos para un Plan de Transición Energética al 2030. <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/355000-359999/356100/res1036.pdf>. (Consulta junio de 2023).
- Javi V. (2013). Efectividad del uso de las TICs en la promoción y formación en energías renovables. Tesis doctoral. Biblioteca de la FCE. U.N.Sa. <http://bibexa.unsa.edu.ar/>
- Javi V., Franco J., Salazar M. X. y Román R. (2018). Veinte años de formación de grado y postgrado en energías renovables en Salta, Argentina: la fortaleza del arraigo local con proyección nacional y regional. ACTAS del XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Madrid, España. Ed. Asociación Española de Energía Solar. ISBN: 978-84-86913-14-4. Madrid, España. <https://agenda.uib.es/15227/files/xvi-congreso-iberico-y-xii-congreso-iberoamericano-de-energia-solar.html>.
- Krause, F.; Bossel, H.; Müller-Reißmann, K. *Energiewende: Growth and Prosperity without Oil and Uranium*. In *Energiewende: Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*; Ein Alternativ-Bericht des Öko-Instituts Freiburg; Öko-Institut: Frankfurt, Germany, 1980. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2021. Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC).
- SGAyDS. 2019. Informe Nacional de Inventario del Tercer Informe Bienal de Actualización de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.
- Rosenow J; Bayer E. Costs and benefits of Energy Efficiency Obligations: A review of European programmes. *Energy Policy*. Vol 107. August 2017. Pp 53 — 62. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.014>

EDUCATION IN ENERGY TRANSITION. SURVEY OF UNIVERSITY-LEVEL AND NON-UNIVERSITY ENERGY RELATED PROGRAMS.

ABSTRACT: This article aims to present the role that education plays in energy transition. To achieve this, an initial definition of this latter concept is provided, and the need for an urgent purposive energy transition is proposed, to reduce Greenhouse Gas Emissions (GHG). The main aspects that have the potential to contribute to the energy transition are enumerated, with an emphasis on those where education can be considered a determining factor for designing and implementing measures. Additionally, an overview of undergraduate and graduate programs with environmental and energy-related themes at the national level is conducted, along with an exploration of the legal framework associated with the implementation of energy education in Argentina. The pedagogical transposition of this energy-related knowledge is discussed in connection with classroom teaching, as well as the appropriate professionals for transmitting this knowledge. Lastly, the necessity of modifying curriculum plans for teaching and bachelor's degree programs is raised for them to include energy education as an additional faculty within the scope of the professional degree.

Keywords: Energy Transition, Energy Education, Didactic Transposition.

VIVIENDAS SOCIALES EN TIERRA DEL FUEGO: RESIDUOS FORESTALES PARA CALEFACCIÓN, AGUA CALIENTE SANITARIA Y REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂

Alfarano Javier², Luque Vazquez Florencia¹, Moreno Valeria¹, Monasterolo Nicolás¹, Carranza Juan Ignacio¹

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Grupo de Investigación en Control Avanzado de Procesos y Producción (GICAPP)

²Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tierra del Fuego
Tel. 2964-651728 – e-mail: jalfarano@frtdf.utn.edu.ar

RESUMEN: Este artículo presenta una solución técnica y sostenible a nivel energético, orientada a la calefacción y Agua Caliente Sanitaria (ACS) para 1.400 viviendas sociales en la provincia de Tierra del Fuego. La propuesta se centra en reducir emisiones de carbono y aprovechar residuos forestales de Tolhuin, clasificada en la zona VI según la Norma IRAM 11.603, con inviernos muy rigurosos y temperaturas mínimas de -16.0°C. En lugar de optar por gas natural, se proponen calderas alimentadas con pellets de madera derivados de biomasa forestal local. Una evaluación técnica detallada de las calderas que consideró potencia térmica, rendimiento y horas de funcionamiento, y teniendo en cuenta la variabilidad en la disponibilidad de pellets, identifica que la implementación podría incrementar en un 2% la cantidad de hogares calefaccionados en la provincia. Esta propuesta no solo tiene el potencial de reducir emisiones de CO₂ y valorizar residuos forestales, sino también de impulsar la economía local y diversificar la matriz energética. A través de este estudio, se establecen bases técnicas para abordar desafíos ambientales y energéticos, promoviendo un enfoque de climatización sustentable frente al cambio climático. Se aclara que el enfoque es energéticamente sostenible, sin abordar aspectos constructivos de las viviendas.

Palabras clave: reducción de emisiones, residuos forestales, energías renovables, calderas a pellets, Tierra del Fuego.

INTRODUCCIÓN

La problemática habitacional en Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur es un tema de alta prioridad, habiéndose declarado la emergencia habitacional, de infraestructura edilicia y equipamiento comunitario, en todo el ámbito de la provincia mediante ley provincial N°1152 en 2017. En medio de esta crisis, el Instituto Provincial de Vivienda adquirió recientemente tierras urbanizadas para la construcción de más de 1.400 viviendas sociales en esta provincia (IPV, 2019). Con la expansión urbana en marcha, se plantea la necesidad de proporcionar servicios esenciales como calefacción y Agua Caliente Sanitaria (ACS) de manera eficiente y sostenible, evitando inversiones costosas en infraestructuras de gas natural.

En este contexto, este trabajo propone un sistema de calefacción y ACS basado en la utilización de residuos forestales de la localidad de Tolhuin, convertidos en pellets de madera, como fuente de energía renovable (kaminoticias, 2021). Esto presenta un esquema de beneficio dual: se abordan parcialmente los desafíos habitacionales y se propone una solución sostenible para los residuos forestales, reduciendo simultáneamente las emisiones de CO₂.

Este trabajo enfatiza la sostenibilidad de la propuesta, que busca reducir tanto la inversión necesaria para infraestructuras de gas como la huella de carbono. Al abordar la necesidad habitacional a través de la calefacción y ACS en viviendas sociales, se pretende que este modelo sirva como punto de partida para futuras políticas y estudios sobre sistemas de calefacción y ACS basados en energías renovables, con el objetivo de contribuir a un futuro más sostenible y equitativo.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio, se ha adoptado una metodología estructurada en varias fases. Gracias a la ejecución de cada una de estas se pudo realizar un análisis profundo y detallado de la situación actual para luego proyectar la situación futura. En el análisis se incluye el nivel de materia prima para la producción del combustible a través de biomasa, como así también, el requerimiento energético para la calefacción de los hogares en la zona de estudio. Con los estudios preliminares y datos de entrada, se analizó la factibilidad del sistema de calderas a pellets de madera para calefacción y ACS aplicadas en 1.400 viviendas sociales.

Fase 1: Relevamiento inicial

Se realizará un relevamiento exhaustivo de los aserraderos ubicados en Tierra del Fuego con el objetivo de obtener información detallada sobre su capacidad de producción, procesos de fabricación y materias primas utilizadas. Se recopiló de manera prioritaria información relevante sobre su operación y producción.

Fase 2: Proporción de aserraderos y localización de línea de pellets

Los datos del relevamiento servirán para proponer la ubicación ideal de una planta productora de pellets teniendo en cuenta la proporción que cada uno de los aserraderos aportaría al total.

Como herramienta para la definición del baricentro geográfico se trabajará con herramientas de geoposicionamiento como la extensión “GeoCode by Awesome Table”. Esta proporciona un código o script que interpreta direcciones para entregar como output localizaciones en latitud y longitud con el agregado de generar un mapa con las posiciones. El objetivo es interpretar geoméricamente la situación de los aserraderos y avanzar sobre técnicas de baricentro ponderado según la información proporcionada por el gobierno nacional sobre las toneladas producidas.

La obtención del baricentro se realiza mediante ecuación matemática, considerando como variable de ponderación la proporción sobre el total de toneladas que cada aserradero genera.

Fase 3: Rendimiento y producción

Se procederá a estimar la evolución de la disponibilidad de pellets en un horizonte de 10 años. Para lograrlo se analizarán los niveles de desperdicio generados en los aserraderos de la zona y el rendimiento de una línea productiva de pellet.

La obtención de la estimación se realizará mediante un método matemático estadístico en donde se utiliza la función polinómica de los valores.

Fase 4: Determinación de la energía necesaria

Para entender el consumo de pellets que demandará una caldera que esté siendo solicitada en una vivienda social a lo largo de los años de estudio se planteará, como primera instancia, calcular la energía térmica [Kcal/año] requerida para calefaccionar y brindar ACS al hogar.

Se utilizará como base la energía térmica requerida en un hogar tipo de Tierra del Fuego. Se trabajará con datos de ENARGAS para estimar el consumo promedio mensual de gas natural durante el año 2022 en un hogar de Tierra del Fuego (ENARGAS, 2023).

Se utilizará como punto de partida para el análisis investigaciones previas (Alfarano et al., 2021) en donde se revela un desglose del consumo promedio mensual para comprender qué porción se destina en un hogar tipo de Tierra del Fuego a calefacción y ACS. Con base en esta información, las proporciones para cada tipo de consumo de gas natural son calefacción 76,1% ACS 14,84%, cocinar 9,06%.

Además, se calcularán los valores anuales de gas natural que efectivamente son requeridos para climatizar y producir ACS. Para ello, se tendrá en cuenta los rendimientos asociados a equipos promedios correspondientes a una estufa de gas natural y calefón. Los valores considerados contemplan una eficiencia del 60% y 80% respectivamente (Juanicó, 2007; Bezzo et al., 2013).

Por último, debido a que el hogar de estudio del presente artículo contempla a una vivienda que se encuentra por debajo de la media, para determinar la energía térmica requerida que debe entregar la caldera se llevará a cabo una encuesta a distintos usuarios de la provincia de Tierra del Fuego. El objetivo en esta instancia es conocer sus consumos mensuales y la información sobre la superficie de su hogar.

5. Fase 5: Determinación de la cantidad de pellets necesarios

Se analizarán diversos equipos disponibles en el mercado, teniendo en cuenta sus características técnicas, con el fin de determinar si la disponibilidad de pellets atiende a la demanda requerida por las calderas.

Los resultados obtenidos serán cuidadosamente analizados y se realizarán comparaciones de las emisiones de CO₂ generadas por los pellets con otras fuentes de energía utilizadas en la región, en este caso el gas natural.

DESARROLLO

1. Relevamiento inicial

Partiendo de que un de rollizo de madera está definido cómo una pieza de madera cilíndrica con largos que van desde los 2 a los 5 metros que se usan para construir estructuras sencillas donde es necesario desarmar y descortezar el tronco de un árbol para luego cortarlo en las medidas necesarias.

Realizando un análisis inicial de los principales ejemplares que se pueden encontrar en Tierra del Fuego, se llega a un valor de densidad del 0,755 Tn/m³ y volumen específico de 1,3245 m³/Tn del rollizo que se utilizará para los cálculos siguientes.

Utilizando los datos reales de extracción de rollizos desde el año 2015 hasta el año 2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, 2022), se puede observar que la tendencia de extracción es ascendente (Tabla 1)

Tabla 1: Histórico (2015-2021) de extracción de rollizos en Tierra del Fuego.

Año	Cantidad [Tn/Año]	Cantidad [m³/año]	Variación Cantidad [Tn/año]
2015	47.647	63.108	
2016	42.488	56.275	-5.159
2017	48.031	63.617	5.543
2018	54.493	72.176	6.462
2019	56.723	75.130	2.230
2020	52.027	68.910	-4.696
2021	71.725	95.000	19.698

A fin de proyectar la extracción de rollizos a 10 años se ha utilizado una herramienta gráfica cómo lo es el trazado de una recta, donde utilizando los datos reales se graficó la línea de tendencia de los mismos.

Luego se han utilizado dos métodos de estimación, uno por recta lineal y otro por recta polinómica. Y teniendo en cuenta el valor de R² para determinar cuál tiene mayor error respecto a lo que sería una

gráfica lineal. El valor R^2 nos indica cuál función tiene una mejor relación con los datos tomados. Si se aproxima a 1 la relación es mejor (Novales, 2010).

Si se tiene en cuenta la ecuación lineal, se podría obtener un resultado más conservador, pero se cree que con menos precisión por los bajos valores que se dieron en la pandemia del 2020. Es por este motivo principalmente que se ha decidido realizar los cálculos con la función polinómica (valor $p=2$) ya que los valores de proyección son más optimistas (Fig. 1).

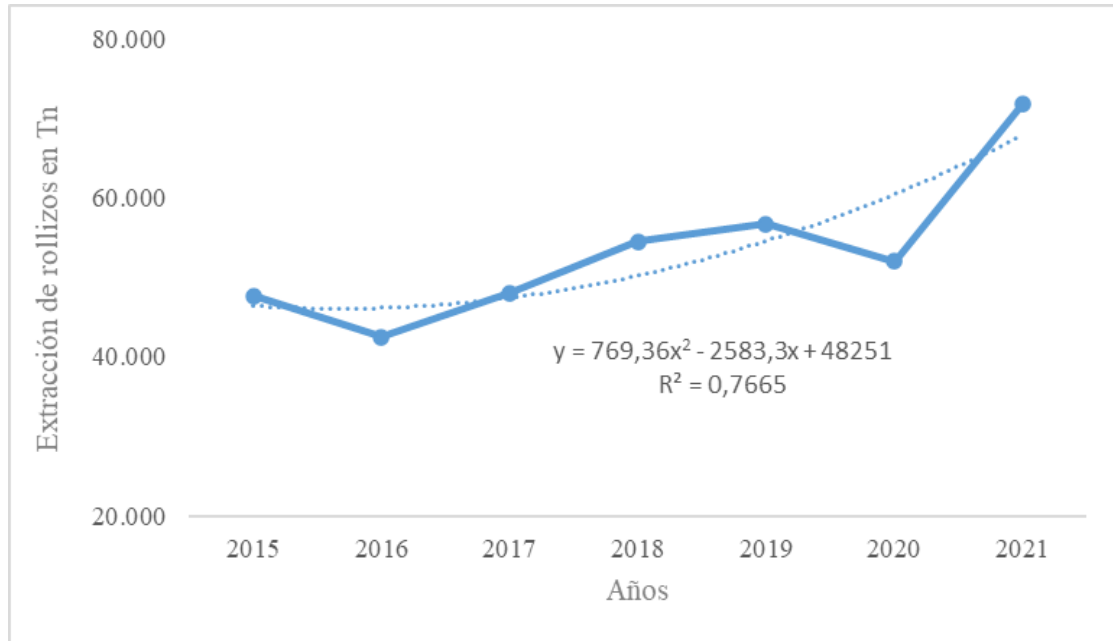


Figura 1: Tendencia función polinómica (valor $p=2$).

Por otro lado, obteniendo el polinomio a partir de los puntos, se puede ver en la Fig. 2 que la función polinómica que representa los valores actuales es de grado 5 (valor $p=5$) (Fig.2).

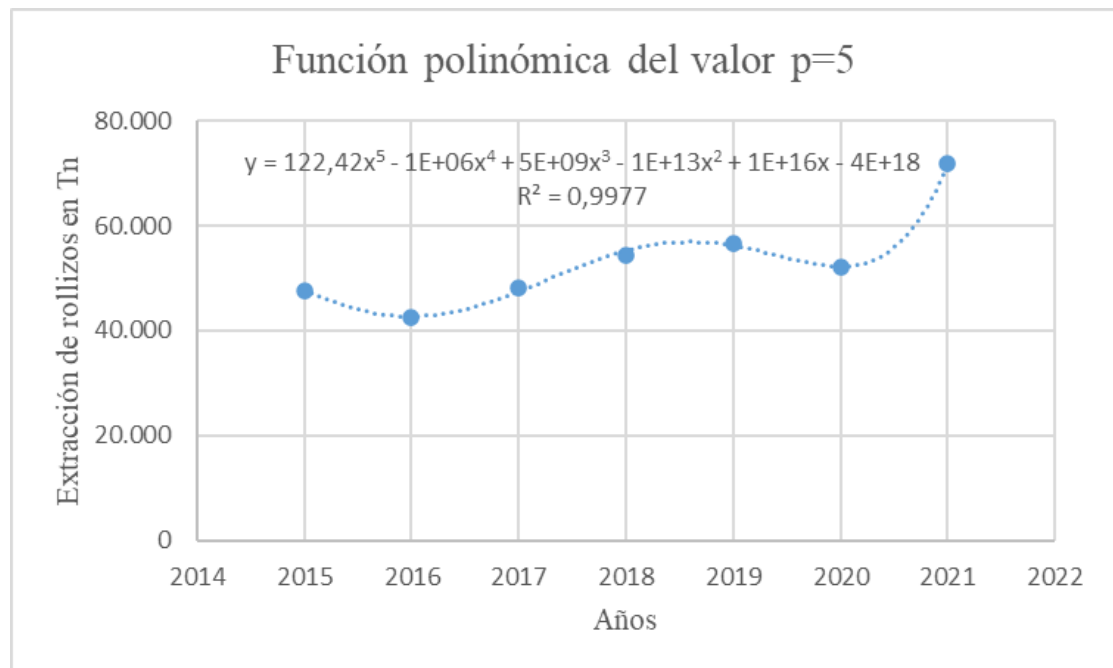


Figura 2: Función polinómica de valor $p=5$

Finalmente se realiza la proyección al año 2033 (con función polinómica valor $p=2$) (Tabla 2).

Tabla 2: Proyección 2022 - 2033 de extracción de rollizos en Tierra del Fuego.

Año	Cantidad [Tn/Año]	Cantidad [m³/año]
2022	76.824	101.753
2023	87.319	115.655
2024	99.354	131.594
2025	112.927	149.572
2026	128.039	169.588
2027	144.690	191.642
2028	162.879	215.734
2029	182.608	241.864
2030	203.874	270.032
2031	226.680	300.238
2032	251.024	332.482
2033	276.907	366.764

2. Proporción de aserraderos y Localización de línea de Pellets

Dentro del marco del estudio sobre el uso de pellets como fuente de energía, se persiguió un entendimiento integral del impacto ambiental asociado. Una parte esencial de este análisis se centra en la valorización de los residuos del proceso productivo, transformándolos no solo en un recurso útil para la sociedad, sino también en una vía para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a la calefacción de viviendas.

Sin embargo, es importante subrayar que, aunque no se cuantificaron las emisiones derivadas del transporte de estos insumos en este estudio, este factor no debe ser omitido en futuras evaluaciones. Es crucial considerar tanto el trayecto desde los aserraderos hasta las plantas de pelletización como desde estas últimas hasta los puntos finales de consumo. La razón de destacar esta omisión radica en la premisa de que el análisis parcial de la cadena podría omitir soluciones sustanciales. Cabe mencionar que "a nivel global, el transporte contribuye con el 15% de las emisiones de gases efecto invernadero. En Argentina, ese porcentaje es del 14%, y las emisiones por transporte no muestran signos de reducción." (Marchini, 2022). Estos datos resaltan la necesidad de incorporar la dimensión del transporte en análisis subsiguientes.

En este contexto, aunque las emisiones del transporte no se calcularon en el presente estudio, su importancia en la ecuación global no puede ser subestimada. Por ello, se sugiere como enfoque futuro la centralización de la producción de pellets, considerando especialmente la localización geográfica y la accesibilidad de los aserraderos.

Tabla 3: Proporciones del mercado de aserraderos de TdF

Aserraderos	Ubicación	Proporción
Aserradero 1	Km 2952,7 según Ruta N°3	0,18
Aserradero 2	Km 2953,4 según Ruta N°3	0,08
Aserradero 3	Km 2953,1 según Ruta N°3	0,04
Aserradero 4	Km 2954 según Ruta N°3	0,11
Aserradero 5	Km 2954,8 según Ruta N°3	0,02
Aserradero 6	Km 2955,3 según Ruta N°3	0,02
Aserradero 7	Km 2954,2 según Ruta N°3	0,02
Aserradero 8	Próximo a la estancia Campo Chico	0,38
OTROS	N/A	0,15

Se hizo referencia a diversas fuentes para identificar los aserraderos (Tabla 3), y se realizó una investigación específica en la región de Tolhuin y alrededores (Cárdenas y Meneses, 2014), resultando en una tabla con ubicaciones precisas (Tabla 4).

Tabla 4: Ubicación de aserraderos.

Aserradero	Latitud	Longitud
Aserradero Mansilla	-54.5107766	-67.1929895
Aserradero Van Olphen	-54.5108893	-67.1929895
Aserradero Iguazu Diosnel Fregosini	-54.5145979	-67.1936302
Forestal del Sur	-54.51798607	-67.18703318
Aserradero Guarani	-54.5090007	-67.1898088
Aserradero El Litoral	-54.5176875	-67.1914375
Aserradero EL ARAUCANO	-54.4964062	-67.2124203
Gage Heibeck Sawmill	-54.50583621	-67.17628652
Piedras Y Maderas	-54.51593486	-67.19274124
Lenga Patagonia SA	-54.45404426	-67.20621827
Baricentro Geografico	-54.50960134	-67.18703906

Detallando acerca del baricentro obtenido se puede mostrar cómo el mismo se encuentra en la localidad de Tolhuin, aun así, su emplazamiento resulta en una zona cubierta de vegetación por lo que se plantea como alternativa moverlo al punto geográfico viable más cercano.

Si bien la ubicación reduciría los gastos de transporte en cuanto a las emisiones, no se debe descuidar el otro lado de la movilidad de pellets ya producidos hacia los diferentes puntos de consumo. Se proponen aun sin tener determinaciones de las ubicaciones de las viviendas sociales que se propongan medios de transporte de reparto, generando que el uso de vehículos contaminantes se reduzca al menos en una proporción. Se propone como futuro de la presente investigación un cálculo detallado de emisiones generadas por la movilidad o transporte, incluyendo una valoración de la propuesta anterior y búsqueda de alternativas mejores.

3. Línea de Pellets: Rendimiento y producción

Calculada la extracción de rollizos con una proyección para los próximos 10 años, es posible determinar la cantidad de pellets que se obtendrían debido a los residuos forestales derivados de la fabricación de productos madereros en donde se utiliza como materia prima dichos rollizos. El volumen de Biomasa sólida (Residuos Forestales) estará directamente relacionado con la capacidad productiva de los aserraderos tomados como análisis en la sección previa.

Como primer punto, es necesario conocer el volumen de desperdicios generados a partir del procesamiento de los rollizos. Para ello, se tuvo en cuenta un estudio realizado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), el cual determinó el rendimiento de un aserradero promedio para la fabricación de molduras en pino (Maslatón et al., 2011).

La investigación muestra que, del total de rollizo que entra a un aserradero, solo el 29% pasa por las tres etapas de transformación necesarias para producir molduras y tableros alistados como producto final.

Por lo tanto, aproximadamente un 70% corresponde a desperdicios generados durante el proceso de fabricación de un producto maderero. Esto demuestra la gran cantidad de Residuos Forestales que genera el proceso productivo, a pesar de que estos rendimientos son considerados eficientes y representativos de las mejores prácticas internacionales.

Por medio de un relevamiento que abarcó a pequeñas y medianas empresas madereras en la zona de estudio, se observa la ciudad de Tolhuin como la de mayor actividad forestal. Se determinó que el rendimiento promedio en producto, aserrín y residuo sólido medido en los aserraderos de la Provincia

se encuentra en el orden del 37%, 32% y 31% respectivamente. Esto implica una generación de Residuos Forestales del 63% al año para la región de estudio (Cárdenas y Meneses, 2014).

Por supuesto, la investigación realizada por el INTI, corresponde a un aserradero promedio, la proporción de desperdicios varían según el tipo de aserradero, las transformaciones de la madera que estén involucradas y el tipo de rollizo (en Tierra del Fuego es la Lengua el que es destinado a la industria forestal). Lo cual el 63% resulta ser un valor que se aproxima a la media determinada por el Instituto.

Teniendo en cuenta los desperdicios generados, es posible estimar la cantidad de pellets de madera que se obtendrían del procesamiento de dichos residuos forestales.

El principal factor que define el rendimiento de una línea de pellets de madera, es el contenido de humedad de la materia prima. En promedio, el contenido de humedad de la madera en su estado natural puede ser mayor al 50%, esto depende de la zona y el tipo de árbol del que se esté tratando. Es importante mencionar, que la Lengua (*Nothofagus Pumilio*) presenta una gran característica, la cual tiene que ver con su gran resistencia a la humedad (Gut, 2017), trayendo consigo elevados rendimientos para la producción de pellets.

Considerando diversas investigaciones asociadas al aprovechamiento de Residuos Forestales para la producción de pellets de madera, los porcentajes de humedad de la materia prima (Desperdicios generados), rondan entre el 40-50%, en donde el contenido de humedad del pellet según los estándares establecidos debe ser menor al 12%.

Por lo tanto, esto ha llevado a que, de los estudios realizados previamente, se haya considerado como rendimiento promedio de una línea de pellets de madera el 65% (Bahamondes Levio, 2015; Prado et al., 2017; Aguinalde González et al., 2019).

De esta manera, con los parámetros correspondientes a porcentajes de desperdicios y rendimiento promedio de una línea productiva de pellets que opere en la zona de estudio considerada, es posible estimar la cantidad de pellets que se fabricarán para cada año proyectado en toneladas por año.

Teniendo en cuenta los parámetros definidos previamente, se estimará la disponibilidad de Pellets de Madera para los años de análisis. Es importante diferenciar que del 63% de residuos, 32% corresponde a desperdicios, pero en estado de Aserrín, chips y virutas, lo cual, a diferencia del 31% que forma parte de la Biomasa Sólida (cortezas, despuntes, entre otros), este último requiere de una operación previa en comparación al primero, que corresponde a la Trituración. De esta manera, la materia prima se encuentra apta para pasar a la etapa de molienda con el fin de homogeneizar todo el material.

Tabla 5: Desperdicios generados por aserraderos

Año	Rollizos [m³/año]	Desperdicios generados [m³/año]	Aserrín, chips, virutas [m³/año]	Residuo Sólido [m³/año]	Equivalente Aserrín [Tn/año]	Equivalente en Residuos Sólidos [Tn/año]
2024	131.594	82.904	42.110	40.794	9.475	12.238
2025	149.572	94.230	47.863	46.367	10.769	13.910
2026	169.588	106.840	54.268	52.572	12.210	15.772
2027	191.642	120.734	61.325	59.409	13.798	17.823
2028	215.734	135.912	69.035	66.877	15.533	20.063
2029	241.864	152.374	77.396	74.978	17.414	22.493
2030	270.032	170.120	86.410	83.710	19.442	25.113
2031	300.238	189.150	96.076	93.074	21.617	27.922
2032	332.482	209.463	106.394	103.069	23.939	30.921
2033	366.764	231.061	117.364	113.697	26.407	34.109
Total	2.369.508	1.492.790	758.243	734.548	170.605	220.364

Con los datos obtenidos podemos estimar el total de desperdicios generados por los principales aserraderos considerados para el análisis (Tabla 5), reflejando esos totales en toneladas anuales, teniendo en cuenta que la densidad de la Lengua en estado de aserrín corresponde a 225 kg/m³ y en estado de astilla (Residuos sólidos) 300 kg/m³.

Determinados los Residuos Forestales totales para cada año de estudio y teniendo en cuenta el rendimiento promedio de una línea productiva de pellets de madera en la zona de estudio, podemos estimar las toneladas anuales de pellets de madera disponibles (Tabla 6).

Tabla 6: Toneladas anuales de pellets de madera.

Año	Pellets a partir de aserrín [Tn/año]	Pellets a partir de Residuos Sólidos [Tn/año]	Producción Estimada [Tn/año]
2024	6.159	7.955	14.113
2025	7.000	9.042	16.042
2026	7.937	10.252	18.188
2027	8.969	11.585	20.554
2028	10.096	13.041	23.137
2029	11.319	14.621	25.940
2030	12.637	16.323	28.961
2031	14.051	18.149	32.200
2032	15.560	20.099	35.659
2033	17.165	22.171	39.335
Total	110.893	143.237	254.130

Estimada la producción anual de pellets en función de la disponibilidad de la materia prima, se debe calcular si el combustible obtenido podrá abarcar la demanda que requieren las calderas para climatizar y brindar ACS a las 1.400 viviendas sociales consideradas como objeto de estudio.

4. Determinación de la energía necesaria: Sustitución de Gas Natural

Teniendo en cuenta las características y el contexto socioeconómico de una vivienda social, es esperable que su consumo de gas natural se sitúe por debajo del promedio general de los hogares en Tierra del Fuego.

El poder calorífico del gas natural para uso residencial está normalizado por la Resolución ENARGAS 622/1998 a 9300 Kcal/m³, se calculó que en 2022 un Hogar Tipo de Tierra del Fuego requirió efectivamente **42.829.129 kcal** para climatizar y producir ACS.

Este último valor es de vital importancia, ya que esta Energía Térmica sirve como parámetro de la caldera, en donde debe alcanzar los mismos valores para así considerar que el confort térmico se satisface. Se recuerda que, debido a las dimensiones de una vivienda social, el confort se debería satisfacer con una cantidad menor de Kcal que la de un Hogar Tipo.

Con los datos obtenidos de la encuesta, fue posible conocer un valor aproximado de consumo asociado a un hogar cuyo tamaño se asemeja a la de una vivienda social, donde la demanda asociada corresponde a un hogar de 40 m², el cual fue el que se tomó como referencia para las viviendas sociales (Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat, 2023).

De esta manera, se pudo determinar que el consumo efectivo promedio de una vivienda social se encuentra por debajo de la media y, por lo tanto, la energía térmica efectiva requerida será menor (Tabla 7).

Tabla 7: Datos fundamentales Hogar Tipo Tierra del Fuego y Vivienda Social.

Hogar de Análisis	Superficie [m ²]	Consumo efectivo promedio mensual del hogar [m ³ /mes]	Energía Térmica efectiva anual requerida para climatización y ACS [Kcal/año]
Hogar Tipo Tierra del Fuego	70	383,77	42.829.129
Vivienda Social	40	213,67	23.845.025

Este último valor es fundamental para la siguiente etapa, ya que él mismo nos indica la energía que debe entregar la caldera para cumplir su respectiva función y, por ende, determinar el consumo de pellets necesario.

5. Determinación de la cantidad de pellets necesarios para alimentar las calderas

En esta sección, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de diversas calderas, considerando una serie de parámetros esenciales para determinar la cantidad de pellets necesarios para su funcionamiento. Las calderas a pellet se evaluaron en función de los siguientes criterios:

- **Potencia Térmica Nominal Obtenida [kW]:** Se registró la potencia térmica nominal generada por cada caldera en kilovatios (kW).
- **Potencia Térmica Nominal Entregada [kW]:** Se tomó en cuenta la potencia térmica nominal entregada, teniendo en consideración el rendimiento de la caldera en términos de eficiencia.
- **Potencia Térmica Nominal en [Kcal/hora]:** Se calculó la potencia térmica nominal en unidades de calorías por hora (Kcal/hora) para una mejor comprensión de la capacidad calorífica.
- **Rendimiento de Potencia Nominal:** El rendimiento de la potencia nominal de cada caldera fue considerado en la evaluación.

Se plantearon diversos escenarios considerando las horas de funcionamiento:

- **Horas de Funcionamiento de la Caldera a Potencia Nominal [hs/día]:** Se determinaron las horas diarias durante las cuales la caldera operaría a su capacidad máxima.
- **Horas de Funcionamiento de la Caldera a Potencia Mínima [hs/día]:** Se establecieron las horas diarias en las que la caldera funcionaría a su potencia mínima.

Mediante la aplicación de estos parámetros y la consideración de las horas de funcionamiento previstas, se procedió a evaluar si existía la cantidad suficiente de pellets disponible para alimentar las calderas de manera eficiente.

Los resultados obtenidos revelaron que en todos los casos se disponía de una cantidad adecuada de pellets para satisfacer las necesidades de energía correspondiente a 23.845.02 [Kcal/año] mencionados en la sección 4.

Debido a los diversos tamaños de equipos que se consideraron para el estudio, se seleccionó el modelo Termo Modena de la empresa Ferroli (Ferroli S.p.A., 2023).

Teniendo en cuenta las especificaciones técnicas del equipo considerado (Tabla 8) y que el hogar de análisis es de 40 m², la caldera para llegar a la energía necesaria estaría funcionando a un 27% de su capacidad máxima.

Tabla 8: Datos caldera termo Modena.

Caldera a Pellet	Potencia Térmica Nominal obtenida [kW]	Potencia Térmica Nominal Entregada [kW]	Potencia Térmica Nominal en [Kcal/hora]	Rendimiento Potencia Nominal	Superficie máxima de climatización [m ²]
TERMO MODENA	12,70	11,59	9.975,57	0,91	98,00

Además, se llevó a cabo un control específico basado en la disponibilidad de pellets proyectada para el año 2024. Esta evaluación permitió determinar si se contaría con la cantidad necesaria de pellets en dicho período. En función de esta evaluación, se identificó el siguiente escenario:

- Cantidad Acorde: Se constató que, para la caldera elegida, la cantidad proyectada de pellets sería adecuada para respaldar su funcionamiento en los 1400 hogares de estudio durante el año 2024. Incluso con un sobrante de pellets de 5.611 Tn.

Considerando que actualmente existen aproximadamente 57.770 hogares (elaboración propia en base a (INDEC, s. f.)) en la provincia de Tierra del Fuego, esta cantidad de viviendas corresponden a un 2% del total en la provincia.

Este análisis de la cantidad de pellets requeridos desempeña un papel fundamental en la planificación y ejecución de la transición hacia sistemas de calefacción y ACS basados en energías renovables, permitiendo tomar decisiones informadas para garantizar un suministro energético sostenible y eficaz en la región de Tierra del Fuego.

Llegando al resultado de que la implementación de este tipo de caldera en hogares de 40 m² podrían dar energía a un mayor número de hogares, en este caso de 2.300.

Ahora considerando el hogar tipo Tierra del Fuego de 70 m², se puede concluir que la caldera utilizada anteriormente llegaría a abastecer 835 hogares que representan un menor número que los planteados inicialmente debido a la insuficiencia de pellets. Cabe destacar que en este caso trabajaría a 75% de su capacidad máxima.

Y, por último, teniendo en cuenta que las emisiones generadas por la caldera a pellets se consideran nulas, se puede decir que en 1400 hogares se estarían eliminando 19.873 [TneqCO₂]. Para realizar este cálculo, se planteó un escenario en el que se examinaron las emisiones potenciales que serían generadas por 1400 hogares y se tuvo en cuenta un factor de emisión basado en el consumo de Gas Natural (GN). A partir de este cálculo, se derivó el valor de emisiones de CO₂ equivalente. Es fundamental señalar que las emisiones producidas por la caldera que utiliza pellets son consideradas nulas, ya que se basan en biomasa, un recurso renovable. Sin embargo, cabe destacar que este estudio centró su atención exclusivamente en las emisiones generadas por el consumo energético directo, dejando fuera factores asociados al transporte y otros elementos relacionados con la cadena de valor. De esta manera, el valor obtenido de 19.873 [TneqCO₂] se focaliza en emisiones directas y no incluye emisiones asociadas a etapas previas o posteriores del proceso. Es importante mencionar que los valores y factores de conversión utilizados en este análisis son preexistentes y están basados en estándares reconocidos en la industria.

CONCLUSIONES

En el presente estudio, se propone una solución innovadora y sustentable para enfrentar las emisiones de carbono y el aprovechamiento de residuos forestales en la región de Tierra del Fuego, mediante la implementación de sistemas de calefacción y Agua Caliente Sanitaria (ACS) que se fundamentan en energías renovables. La transición de equipos convencionales de gas natural a calderas a pellets de madera marca un avance importante hacia la reducción de la huella de carbono y la optimización de recursos naturales. Este estudio ofrece un análisis exhaustivo en términos de viabilidad técnica, económica y ambiental, y propone un marco para adaptar la solución en otras regiones con desafíos análogos.

La evaluación meticulosa de diversas calderas, tomando en cuenta parámetros esenciales como la potencia térmica, el rendimiento y las horas de funcionamiento, brinda una perspectiva completa sobre las necesidades energéticas y la viabilidad técnica de la propuesta. El análisis destaca que, aunque en ciertos contextos existe una cantidad apropiada de pellets para alimentar las calderas, en otros se evidencia una carencia en la disponibilidad de estos. Este hallazgo subraya la necesidad de una administración eficaz de los recursos y una planificación estratégica para asegurar un suministro energético constante y fiable.

La propuesta no solo promueve un impacto ambiental positivo, reduciendo las emisiones de CO₂ y valorizando los residuos forestales, sino que también trae consigo beneficios económicos y sociales. La utilización de biomasa forestal como recurso energético incentiva la generación de empleo en la región, fortaleciendo su economía, y a la vez, potencia la autosuficiencia y diversificación energética.

Es imperativo subrayar que para que esta propuesta sea exitosa se requiere de una colaboración estrecha entre el Gobierno de Tierra del Fuego, la industria maderera, comunidades locales y otros actores clave. Adicionalmente, es vital asegurar una gestión sostenible de la biomasa forestal para prevenir impactos adversos en los ecosistemas locales. Esta gestión sostenible no solo beneficia al medio ambiente, sino que también potencia la economía local y la independencia energética de la región.

En resumen, este estudio presenta una estrategia integral y viable para enfrentar retos ambientales y energéticos en Tierra del Fuego. La adopción de sistemas renovables no solo representa un paso hacia la conservación y sostenibilidad, sino que también establece un camino más resiliente en el combate al cambio climático.

REFERENCIAS

- Aguinalde González, X., Garry, J. M., Pucciarelli, I. E., & Rodríguez Bosque, J. M. (2019). Producción de pellet de madera a base de residuos y subproductos de la industria forestal [UTN-FRLP].
- Alfarano, J., Pereyra, G., Martina, N., & Moreno, V. K. (2021). Impacto de la aplicación de buenas prácticas en el uso de calefacción tradicional y renovable en la Patagonia Argentina. En COINI 2020—XIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial (pp. 63-74). edUTecNe.
- Bahamondes Levio, M. (2015). Formulación y evaluación de proyecto de fábrica de pellets de madera en la región de Los Lagos [Universidad Austral de Chile].
- Bezzo, E. J., Bermejo, A., Cozza, P. L., Fiora, J. A., Maubro, M. A., Prietoy, R., & Gil, S. (2013). Eficiencia de calefones—Importancia de los consumos pasivos. Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía, Buenos Aires.
- Cárdenas, E., & Meneses, C. (2014). Generación de energía eléctrica a partir de biomasa forestal [Proyecto Final]. UTN-FRRG.
- ENARGAS. (2023). Datos Abiertos. Datos operativos de Transporte y Distribución de Gas. Dirección URL: <<https://www.enargas.gov.ar/secciones/transporte-y-distribucion/datos-operativos.php>> [consulta: 13 de agosto de 2023].
- Ferrolí S.p.A. (2023). TERMO MODENA [Ficha Técnica]. En www.ferroli.com/media/ficha-tecnica-termo-modena.pdf Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.
- Gut, B. (2017). Árboles nativos e introducidos en Patagonia. Vásquez Mazzini Editores.
- INDEC. (s. f.). INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina. Recuperado 14 de septiembre de 2023, de <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel3-Tema-2-41>
- IPV. (2019, febrero 15). Avanza la urbanización de 1.400 lotes para vecinos de Río Grande. En <http://www.ipvtdf.gov.ar/#!/noticias/avanza-la-urbanizacion-de-1-400-lotes-para-vecinos-de-rio-grande> Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.
- Juanicó, L. (2007). Eficiencia de calefactores a gas de tiro balanceado: Medición e impacto en usuarios residenciales. *Interciencia*, 32(12), 854-856.
- kaminoticias. (2021, septiembre 30). Proyecto de Ley para transformar los residuos forestales en material combustible para calefaccionar los hogares de la provincia de Tierra del Fuego Antártida e Islas del Atlántico Sur. Kaminoticias. En <https://kaminoticias.ar/proyecto-de-ley-para-transformar-los-residuos-forestales-en-material-combustible-para-calefaccionar-los-hogares-de-la-provincia-de-tierra-del-fuego-antartida-e-islas-del-atlantico-sur/> Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.
- Marchini, T. (2022). Clima. El Gato y La Caja. En <https://elgatoylacaja.com/clima/indice> Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.

- Maslatón, C., González, A. L., & Miño, A. (2011). Pellets de madera para usos energéticos (Cifras para pensar, p. 6). Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. (2022). Anuario de Estadística Forestal: Productos primarios, carbón y durmientes. Productos manufacturados. Incendios Forestales. Comercio exterior. (2022.^a ed.). En <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/estadistica-forestal> Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.
- Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat. (2023). Modelos de Vivienda | Argentina.gob.ar. En <https://www.argentina.gob.ar/habitat/modelos-de-vivienda> Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.
- Novales, A. (2010). Análisis de Regresión. En <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf> Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.
- Prado, J. B., Gostuski, L., Mosteiro, M. L., Rodríguez Padilla, M. L., & Crosta Blanco, P. (2017). Instalación de una planta de pellets de madera [Instituto Tecnológico de Buenos Aires - ITBA]. En <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1206> Recuperado de URL el 13 de agosto de 2023.

SUSTAINABLE HOUSING IN TIERRA DEL FUEGO: USING FORESTRY WASTE FOR HEATING, DOMESTIC HOT WATER, AND CO₂ EMISSION REDUCTION

ABSTRACT: This article presents a technical and energy-sustainable solution aimed at heating and Domestic Hot Water (DHW) for 1,400 social housing units in the province of Tierra del Fuego. The proposal focuses on reducing carbon emissions and leveraging forestry waste from Tolhuin, classified in zone VI according to the IRAM 11.603 standard, with harsh winters and minimum temperatures of -16.0°C. Instead of choosing natural gas, boilers powered by wood pellets derived from local forestry biomass are proposed. A detailed technical evaluation of the boilers, considering thermal power, performance, and operating hours, and taking into account the variability in pellet availability, indicates that implementation could increase the number of heated homes in the province by 2%. This proposal not only has the potential to reduce CO₂ emissions and valorize forestry waste but also to boost the local economy and diversify the energy matrix. Through this study, technical foundations are established to address environmental and energy challenges, promoting a sustainable heating approach in the face of climate change. It is clarified that the approach is energy sustainable, without addressing constructive aspects of the housing.

Keywords: emission reduction, forestry waste, renewable energy, pellet boilers, Tierra del Fuego.

HORNO SOLAR TUBULAR CON CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO

Tarifa H. Yamil¹, Di Lalla Nicolas¹, Díaz Andrés Emanuel¹, Hernández Alejandro Luis¹

¹INENCO (UNSa-CONICET), Av. Bolivia 5150, CP A4400FVY, Salta, Argentina.

RESUMEN: este trabajo se realizó en el marco de la cursada de la materia "Materiales de Construcción de Equipos Solares" de la Tecnicatura en Energías Renovables de la UNSa. En este sentido, se elaboró un horno tubular que opera con un reflector del tipo concentrador parabólico compuesto (CPC). El recinto de horneado es un tubo de 0,13 m de diámetro y 0,65 m de largo. El CPC posee un área frontal de captación de aproximadamente 0,45 m² (0,7 m x 0,65 m), la relación de concentración geométrica resultó de 1,7. Los ensayos térmicos mostraron, a pesar de la pequeña área de captación solar del dispositivo, que el horno pudo llegar al mediodía, en épocas de bajas temperaturas, a 120 °C, suficiente para poder realizar horneados. Se muestra el proceso de construcción y se detallan los materiales y técnicas utilizadas. Se presentan los resultados de los ensayos térmicos realizados, y para evaluar su funcionamiento práctico se realizaron horneados de panes y de budines.

Palabras clave: horno solar, tubular, CPC

INTRODUCCIÓN

Gran parte del territorio argentino carece de red de gas, solo el 58,4% de los hogares de Argentina disponen gas de red o electricidad para cocinar, el restante 42,6% usa garrafas o leña. Esta afirmación está respaldada por los resultados del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas de 2022 realizado por el INDEC. En el caso de utilización de garrafas su precio es mucho mayor que el gas de red. Por otro lado, si se utiliza leña o la quema de algún otro combustible, se pone en riesgo la salud de las personas por la inhalación de los gases de la combustión (OMS, 2022), además de ser métodos poco respetuosos con el medio ambiente, debido a la deforestación que generan (Abdela, 2019). Ante esta problemática, para dar una solución sustentable, desarrolladores que trabajan en el área de las fuentes renovables, proponen distintos tipos de cocinas solares (Erdem Cuce et al., 2013). Las de tipo caja acceden a moderadas temperaturas, y las de concentración pueden acceder fácilmente a temperaturas mayores a los 150 °C, ya sea las directas, como las indirectas (Di Lalla et al., 2022). Debemos resaltar la gran importancia de la utilización diaria de estas tecnologías por parte de comunidades aisladas (Padonou et al., 2022) y tratar de difundirlas. En este trabajo se propuso elaborar un horno solar capaz de alcanzar fácilmente temperaturas del orden de los 120 °C a 130 °C, valores que son suficientes para el horneado completo de pan (Vanina et al., 2009). Se decidió entonces la elaboración de un horno solar tubular que opere con radiación concentrada, utilizando un reflector de multisuperficie (Xinglong et al., 2019). Estos están pensados para aumentar el ángulo de aceptación, mejorar la eficiencia de interceptación de la luz y homogeneizar la distribución de energía en el absorbedor. En particular por la geometría del absorbedor se eligió la óptica CPC (Jiang et al., 2020), en este caso el reflector está compuesto por una involuta y una parábola. Entonces, elaboramos un horno solar tubular, de relativo bajo costo, que opera con un reflector del tipo CPC. Buscamos que el horno sea capaz de alcanzar temperaturas moderadas del orden de los 120 °C utilizando técnicas y materiales de bajos costos (en lo posible con materiales reciclados). Pensamos que este tipo de hornos solares puede ayudar, por lo menos como una solución complementaria, al reemplazo del uso de cocinas que utilizan electricidad, leña o gas envasado.

PARTE EXPERIMENTAL: DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Tubo colector

Las características y dimensiones utilizadas en el prototipo presentado aquí, se determinaron a partir del tamaño de dos budineras preexistentes (0,31 m x 0,12 m x 0,06 m cada una). Entonces para poder contenerlas, se decidió elaborar un tubo de 0,13 m de diámetro y 0,65 m de largo que actuará como horno. El tubo está construido con chapa galvanizada calibre 25 que fue cilindrada y agrafada. Su superficie externa fue ennegrecida con pintura negro mate para altas temperaturas. En los laterales del tubo se le colocaron sendas tapas discoidales elaboradas con madera. También se construyó una bandeja de aluminio para la colocación de los elementos a hornear (pan, budines, semillas, frutas, etc.).

Superficie reflectora

El CPC en el cual se dispone el tubo consta de una involuta y una parábola. El radio generatriz a partir del cual se trazó la involuta es el radio del tubo absorbedor ($R=0,065$ m). El perfil del CPC se diseñó de tal manera que la involuta y la parábola queden empalmados para lograr una buena apertura de captación solar. Su trazado se realizó a través del programa GeoGebra, en base a las clases del profesor Alejandro Hernández de la cátedra de "Materiales de Construcción de Equipos Solares" de la Tecnicatura en Energías Renovables de la UNSa. La Fig. 1 muestra el trazado a escala del medio perfil del CPC mediante el programa GeoGebra. El segmento de parábola (tramo BC) fue empalmado, a la involuta (tramo AB), a la altura del diámetro del círculo (punto B). Los rayos solares pueden llegar al tubo de manera directa, por simple reflexión en la involuta, o por doble reflexión primero reflejándose en la parábola y luego en la involuta (rayos 1, 2 y 3 de la Fig. 1).

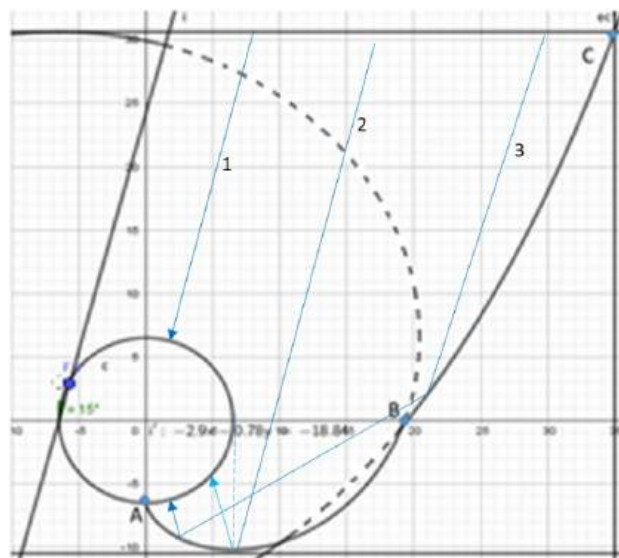


Figura 1. Trazado a escala del perfil CPC mediante el programa GEOGEBRA.

El reflector se elaboró con la utilización de lámina de aluminio reflectante, en nuestro caso reciclada, cuya reflectancia original en el espectro visible era de 82%. Este reflector tiene un área de captación de $0,7 \text{ m} \times 0,65 \text{ m} = 0,45 \text{ m}^2$. La relación de concentración geométrica definida como el cociente entre el área de captación y el de absorción resultó de $0,455/0,265=1,7$.

Armado del horno

Las láminas reflectantes están soportadas mediante costillas con la forma del CPC realizadas con placas de madera de 10 mm de espesor. La estructura externa del horno fue elaborada con placas de madera reciclada de $\frac{3}{4}$ de pulgada de espesor, a la cual se le practicó una puerta lateral a la altura del tubo absorbedor, de $0,16 \text{ m} \times 0,16 \text{ m}$ para ingresar los elementos a hornear. En la parte interna de la estructura se colocó una aislación de 40 mm de espesor de poliestireno expandido de baja densidad, 15 kg/m^3 . La cubierta transparente es de vidrio de ventana de 4 mm de espesor, también reciclado. En

la Fig. 2 se muestra un esquema en corte del horno con sus dimensiones externas. La Fig. 3 muestra parte del armado del horno, y la Fig. 4 muestra la foto del horno terminado.

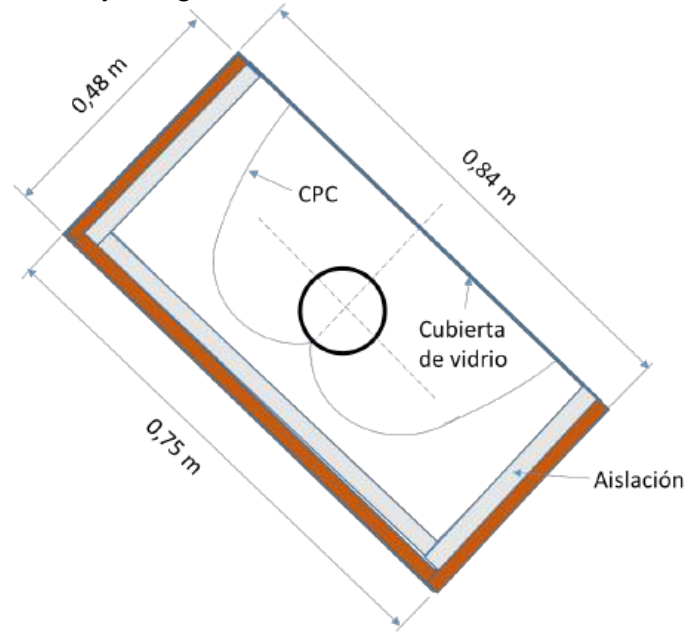


Figura 2. Esquema lateral del horno y sus medidas externas

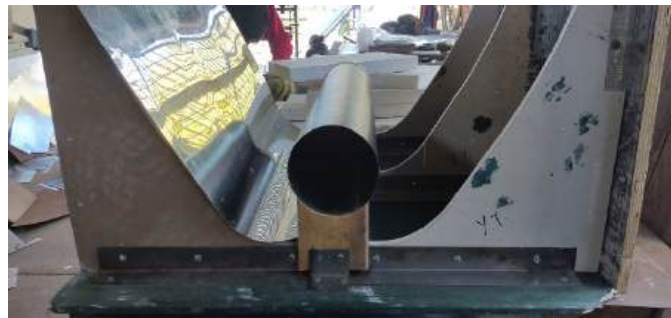


Figura 3. Ubicación del tubo absorbedor y las láminas reflectantes.



Figura 4. Foto del horno tubular CPC terminado.

RESULTADOS

Mediciones térmicas

Las mediciones térmicas realizadas en el prototipo se basaron fundamentalmente en observar como varia la temperatura dentro del horno sin carga térmica, desde la mañana hasta horas del mediodía, estableciendo cual es la temperatura alcanzada a las 12:00 hs, y así evaluar si está listo para su utilización en ese momento. Las mediciones fueron efectuadas en días de invierno en la Ciudad de Salta. Se utilizaros dos termocuplas tipo K (error estimado $\pm 0,5$ °C), una puesta en el centro del horno y otra en el ambiente exterior. Las temperaturas fueron registradas por intermedio de un adquisidor de datos modelo MyPClab de NOVUS. La base de tiempo de los registros de temperaturas, corresponden en todos los casos a la hora oficial local (la cual se encuentra 1 hora y 27 minutos adelantada respecto de la hora solar). La irradiancia (W/m^2) se midió con un solarímetro fotovoltaico portátil, de error aproximado de ± 10 W/m^2 , ubicado en el plano de captación del reflector, el cual se orientó estacionariamente al Norte e inclinado con una pendiente de $\beta \approx 45^\circ$.

Evolución diaria de la temperatura interna del tubo

Se evaluó la evolución de temperatura del horno sin carga en un día claro desde la mañana hasta el mediodía. La Fig. 5 muestra el resultado. Se observa que a las 12:00 hs el horno alcanzó 110 °C, temperatura suficiente para iniciar un horneado. El máximo de temperatura fue de 120 °C a las 12:45 hs. Los valores de irradiancia correspondientes a esta medición se muestran en la Tabla 1.

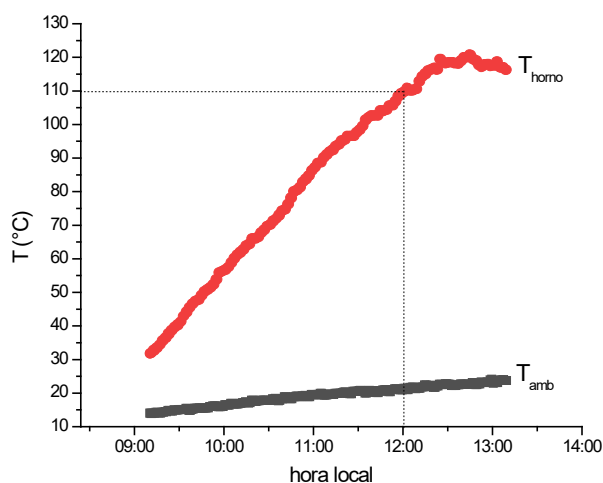


Figura 5. Evolución de temperatura en el interior del horno en un día de invierno.

Tabla 1. Irradiancias correspondientes al día en que se efectuó la evaluación del horno.

hora	Irradiancia (W/m^2)
09:00	57
09:30	104
10:00	197
10:30	450
11:00	501
11:30	670
12:00	780
12:30	850
13:00	880
13:30	840
14:00	732
14:30	775

15:00	700
15:30	670
16:00	236
16:30	162
17:00	60

Horneado de un budín

Para probar el horno en situación real se realizaron varios horneados de pan y de budines. Por ejemplo, en el caso del horneado del budín, éste fue ingresado al horno aproximadamente a las 11:50 hs con una masa húmeda de 0,75 kg con el horno a una temperatura de 112 °C. Al cabo de aproximadamente 2 horas se completó la cocción. La masa perdió aproximadamente un 15% de su peso inicial resultando una pieza horneada de 0,65 kg. En la Fig. 6 se observan los registros de las temperaturas del horno durante el horneado del budín, y en la Fig. 7 se muestra una foto del resultado obtenido.

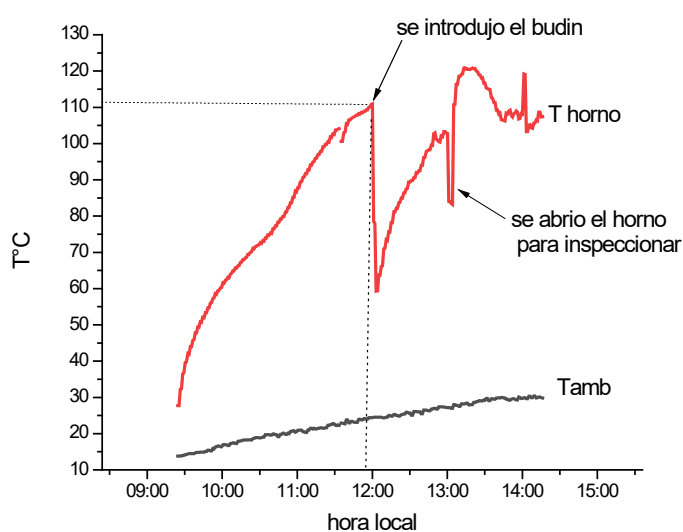


Figura 6. Evolución de temperatura en el horneado de un budín.



Figura 7. Foto del resultado del horneado del budín

Además, se pudo hornear una tira de pan integral de aproximadamente 0,75 kg, y galletas (Fig.8).



Figura 8. Fotos de horneados de pan integral, un budín y galletas.

CONCLUSIONES

A pesar de la utilización de materiales reciclados y el empleo de técnicas constructivas sencillas hemos elaborado un horno solar que cumple su función en tiempo y forma.

Si bien posee un área de colección pequeña ($0,45 \text{ m}^2$) el horno pudo alcanzar, al mediodía y en invierno, una temperatura cercana a los $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Con las dimensiones, materiales y técnicas utilizadas en la construcción de este horno solar, se podría elaborar aproximadamente $0,7 \text{ kg}$ de pan integral por día.

Se concluye que, por simpleza, practicidad y desempeño, el modelo de este horno solar puede ser replicado pudiendo, para ciertas tareas de cocción, reemplazar la utilización de fuentes convencionales no renovables para esta actividad, ayudando a la economía doméstica y al medio ambiente.

REFERENCIAS

- Abdela, Umer. (2019). Review on Environmental and Social Impacts of Rural Household Traditional Biomass Energy Utilization. Journal of Energy Technologies and Policy Vol.9, No.9.
- Di Lalla N., Díaz A., Hernández A. (2022). Cocina Solar de Alto Rendimiento con Aplicación de Tubo Evacuado Selectivo y Concentrador CPC. Actas de la XLIV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Vol. 9, pp 30-38 2022 ISBN 978-987-29873-1-2.

- Erdem Cuce, Pinar Mert Cuce (2013). A comprehensive review on solar cookers. *Applied Energy*. Volume 102, Pages 1399-1421.
- Jiang C., Yu L., Yang, S., Li K., Wang, J., Lund, P. D., & Zhang, Y. (2020). A review of the compound parabolic concentrator (CPC) with a tubular absorber. *Energies*, 13(3), [695]. <https://doi.org/10.3390/en13030695>.
- OMS (2022). Household air pollution and health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.
- Padonou E.A., Akabassi G.C., Akakpo B. A., Sinsin B. (2022). Importance of solar cookers in women's daily lives: A review *Energy for Sustainable Development*, Volume 70, October 2022, Pages 466-474.
- Xinglong Ma., Hongfei Zheng, Shuli Liu, (2019). Review on Solar Concentrators with Multi-surface and Multi-element Combinations. *Journal of Daylighting* 6(2):80-96. DOI:10.15627/jd.2019.9.
- Vanina T., Lucasa and Trystram G., (2009). Crust formation and its role during bread baking. *Trends in Food Science & Technology* 20.

TUBULAR SOLAR OVEN WITH COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR

ABSTRACT: This work was carried out within the framework of the subject "Materials for Construction of Solar Equipment" of the Renewable Energy Technicature of the UNSa. In this sense, a solar tubular oven was developed that operates with an anidolic-type reflector concentrator (compound parabolic concentrator or CPC). The baking chamber is a tube 0,13 m in diameter and 0,65 m long. The CPC has a frontal solar collection area of approximately 0,45 m² (0,7 m x 0,65 m), the geometric concentration ratio was 1,7. The thermal tests showed, despite the small solar collection area of the device, that the oven could reach 120 °C at noon, in times of low temperatures, enough to be able to carry out baking. The construction process is shown and the materials and techniques used are detailed. The results of the thermal tests carried out are presented, and to evaluate its practical operation, baked breads and puddings were carried out.

Keywords: solar oven, tubular, CPC

NOCIONES DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN SALTA: UNA APROXIMACIÓN A CÓMO (RE) PRODUCEN SENTIDOS LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN LOCALES (ARGENTINA, 2023)**Facundo D.F. Gonzalez¹, Melanie L. Pedraza², Candelaria N. Cornú³, Belisario Mendieta Albarracín⁴**¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO/CONICET)- Facultad de Ciencias Exactas-Universidad Nacional de Salta. Avenida Bolivia N°5150. C.P. 4400 (Salta-Argentina).^{2,3,4} Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta- Av. Bolivia N°5150. C.P.4400 (Salta- Argentina).

Tel. +54387-5809428 - e-mail: facundoinenco@gmail.com

RESUMEN: El objetivo del trabajo es analizar las nociones de transición energética que (re)producen los medios de comunicación de la provincia de Salta. El período tomado es el primer semestre del año 2023. Se utilizó la categoría de imaginario sociotécnico para abordar las nociones relacionadas con la transición energética que se manifestaban en los medios. Las técnicas del estudio se apoyaron en la investigación documental y codificación axial como base de la estrategia metodológica de recolección y análisis de datos, respectivamente. A partir de la observación y la sistematización de la documentación se construyó un corpus de textos noticiosos que refirieran explícitamente sobre Transición Energética en los paratextos de los medios. Los resultados dan cuenta de la hegemonía de nociones que vinculan imaginarios de transición con descarbonización, aunque distanciados de la versión de justicia socioambiental. Esto se da en línea con una propuesta de descarbonización apoyada en los imaginarios desarrollista y mercantil. De manera periférica, pero disputando sentidos alternativos, emergen nociones que relacionan la transición con la urgencia de garantizar el acceso a la energía. El trabajo reconoce la potencia de los medios como reproductores de nociones que responden a intereses disímiles entre las necesidades del norte y del sur global.

Palabras clave: imaginario sociotécnico, transición energética, medios de comunicación.

INTRODUCCIÓN

El espacio ganado por la propuesta de transición energética (TE) como descarbonización se expresa en diferentes ámbitos: en la agenda política global tanto de los Estados-Nación y los organismos internacionales como de las instituciones dedicadas a la ciencia e investigación, las industrias y los medios de comunicación (González *et al*, 2023; Svampa y Bertinat, 2022; Bertinat *et al*, 2020; Boyer, 2019). Esto se debe, por una parte, a la visibilización mediática que señala el agotamiento de combustibles fósiles a nivel global, y, por otra parte, al agravamiento del cambio climático producto de la emisión de gases de efecto invernadero consecuencia de la actual matriz energética. Además, la crisis internacional tras la pandemia Covid-19 y la guerra en el Este de Europa han propiciado el desarrollo de alternativas productivas-energéticas que se obtienen de fuentes naturales. Estas fuentes de energía, también llamadas energías renovables -en adelante ER-, son consideradas menos perjudiciales con el medio ambiente, paliativas del cambio climático e impulsoras del desarrollo económico (Garrido, 2022).

Desde el Norte Global se propone una TE asociada a la descarbonización (González *et al*, 2023), vinculada con la llamada “propuesta verde”. Ésta ubica a los países del Sur Global como proveedores de recursos naturales, con una participación periférica y reducida en la toma de decisiones. Además, no considera rasgos centrales de territorios con demandas específicas, algunas coincidentes con la descarbonización, pero no exclusivas o primordiales.

Las Ciencias Sociales aportan a la discusión sobre los sentidos de Transición Energética

Una de las concepciones más dominantes para explicar la TE es el reemplazo de fuentes energéticas fósiles por ER (Garrido, 2022; Boyer, 2019). Sin embargo, esta definición del fenómeno resulta demasiado simplista, lineal e insuficiente, ya que, si bien las tecnologías juegan indudablemente un papel relevante en todas las actividades humanas, estas no operan de forma aislada. Las tecnologías actúan como parte de procesos heterogéneos en los que se vinculan conocimientos, valores, prácticas sociales, relaciones de poder, intereses económicos y marcos legales y normativos (Garrido, 2022). Es por esto último que la TE no puede ser comprendida de otra manera que no sea como un proceso de cambio socio-técnico (Garrido, 2022).

En algún momento la discusión sobre TE fue propia del movimiento ecologista; luego, estuvo reducida estrictamente a instancias de debate supraestatal (Gutiérrez Ríos, 2022). Sin embargo, en la actualidad, dejó de ser así y se complejiza de tal modo que existen diversos planteos y posicionamientos alrededor del fenómeno (Svampa y Bertinat, 2022).

En trabajos anteriores (González *et al*, 2023; 2022; Ariztía *et al*, 2017) se ha problematizado acerca de la potencialidad de las ciencias sociales para el estudio de fenómenos complejos como la TE. El análisis de la problemática energética requiere de considerar los aspectos materiales, técnicos, sociales y culturales que la constituyen, además de las diversas implicaciones que existen entre energía y sociedad (Ariztía *et al*, 2017). En este sentido, consideramos relevante pensar el rol que tienen los medios masivos de comunicación en la (re)producción y circulación de sentidos sobre TE, a partir del papel preponderante que éstos cumplen en los procesos de aprehensión de la realidad que forma parte de la vida cotidiana de las sociedades (González *et al*, 2022).

A lo largo de las dos primeras décadas del siglo XXI, se han multiplicado los sectores políticos que impulsan una agenda de transformación del sistema energético entendido como TE. Los medios de comunicación revelan una heterogeneidad de significados y el concepto de TE está lejos de tener un significado natural: es un concepto cargado de aspectos políticos, dinámicos y dotados de sentidos en disputa (Svampa y Bertinat, 2022). Para Felipe Gutiérrez Ríos (2022), los significados de la TE se (re)construyen durante el transcurso de un proceso de mediatización de la sociedad, en el cual los medios de comunicación se transforman en productores de sentido, más que en representaciones de la realidad. La cobertura mediática sobre el proceso de TE da cuenta de una agenda pública que se apoya en una discusión de diferentes niveles. Un nivel, quizás el más extendido, refiere al cambio de fuente energética (descarbonización). Otros niveles, menos discutidos, señalan aspectos relacionados al acceso a la energía, las condiciones de hábitat y el derecho a la energía como habilitador de otros derechos humanos (Durán 2023, Svampa y Bertinat, 2022; Gonza *et al*, 2022). De este modo, se considera que la TE es abordada en los medios de comunicación (re)produciendo imaginarios sociotécnicos que posicionan a la TE como el cambio de un sistema basado en la combustión de fósiles hacia uno orientado a las ER. Estos imaginarios son necesarios de desentrañar para poder comprender cómo se está pensando el proceso de cambio energético y social que implica la TE.

MÉTODO

El objetivo de este trabajo se orienta al análisis de las nociones de TE que (re)produjeron los medios de comunicación de la provincia de Salta durante el primer semestre del año 2023. Para ello, se desplegó una estrategia teórica-metodológica que se presenta en dos apartados que dan cuenta de instancias cognitivas y reflexivas consecuentes.

Enfoque conceptual

Las bases teórico-epistemológicas del trabajo se apoyan en la concepción de la TE como Problema Sociotécnico y Ambiental Relevante (González *et al*, 2023). La propuesta conceptual deriva del concepto de Problema Social Relevante (Kreimer y Zabala, 2006). En relación con este problema, la mayor parte de los actores (poderes públicos, comunidades científicas, organismos internacionales y de la sociedad civil) manifiestan la creencia en que el desarrollo y la aplicación de conocimientos científicos y tecnologías pueden contribuir a superarlos o aliviarlos (Kreimer y Zabala, 2006). Esta tendencia se pone de manifiesto en la formulación de planes estratégicos e incentivos a ciertos sectores

de I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación) que pueden, o no, expresarse en los medios de comunicación.

Las dimensiones de este Problema Social Relevante y Ambiental tienen aspectos técnicos y sociales que tensionan, se cruzan, se yuxtaponen y emergen de formas diferentes. Estas se expresan en líneas de investigación que entienden la TE como un proceso complejo (Cornú *et al*, 2023, Pedraza y González, 2023) y se expresa en 1) Los sentidos sobre TE en medios de comunicación, 2) Los imaginarios sociotécnicos de TE en la producción y desarrollo científico-tecnológico en el campo de estudios de la energía y hábitat para mitigación del cambio climático, 3) Imaginarios de TE en el diseño y gestión de políticas públicas de infraestructura, de acceso a la energía y mitigación de la pobreza energética, 4) La vinculación entre las propuestas de TE y Economía Circular, 5) Experiencias orientadas a procesos de TE 6) Imaginarios de TE relacionados con la movilidad sustentable y la minería de litio, 7) Desarrollo de tecnologías de cambio de fuente y equipos alternativos o complementarios.

El trabajo se inscribe en la línea de investigación que pretende dar cuenta de la circulación de sentidos sobre TE en medios de comunicación. Se empleará el concepto de Imaginario Sociotécnico para acceder a una parcialidad de esos sentidos. Interesa particularmente este concepto porque se vincula con el de problemáticas sociales asociadas a la dimensión energética del hábitat.

La noción de imaginario sociotécnico fue propuesta por Sheila Jasanoff y Sang-Hyun Kim (2009) para analizar la TE y la energía nuclear entre los Estados Unidos y Corea del Sur. Posteriormente, el concepto ha sido utilizado en numerosos estudios en los que se abordan cuestiones del sistema energético en general, muchos de ellos vinculados a las ER. En rigor, es pertinente incorporar la definición de imaginario sociotécnico que “refiere a las formas colectivamente imaginadas de la vida social que se inscriben en el diseño y puesta en marcha de proyectos tecnocientíficos a escala nacional” (Jasanoff y Kim, 2009) para abordar las especificidades políticas, sociales, culturales, sanitarias, ambientales y científicas-tecnológicas en torno al fenómeno.

Hubert y Spivak L’Hoste (2021) proponen la noción de imaginario sociotécnico para analizar y comparar los diferentes modelos energéticos deseables tal como se proyectan por los actores involucrados. El concepto permite, por un lado, abordar de manera conjunta repertorios de argumentos que frecuentemente se asocian a diferentes mundos sociales (político, económico, tecnocientífico, etc.); y, por otro lado, ofrecer herramientas para mostrar cómo las políticas energéticas están modeladas por consideraciones tecnopolíticas de la escala local. Hubert y Spivak L’Hoste (2021) distinguen tres imaginarios sociotécnicos que modelaron y orientaron las decisiones tecnológicas en materia de energía eléctrica en Argentina: el imaginario mercantil, el imaginario desarrollista y el imaginario de la justicia socioambiental. El primero, es un imaginario orientado por y para el mercado. La política energética en Argentina está guiada por una lógica de mercado y una visión mercantilista de la producción y el consumo de energía eléctrica. El segundo imaginario postula al sector energético como un instrumento clave para el desarrollo económico e industrial del país. Este imaginario desarrollista se orienta por una visión política de la matriz eléctrica y tiene por objetivo la búsqueda de soberanía energética, ya que considera que ésta garantizará independencia y abastecimiento energético a nivel nacional. Por último, el imaginario de la justicia socioambiental “sostiene la necesidad de alcanzar una transición energética que no solo se asiente en una diversificación de la matriz energética, sino que impulse iniciativas respetuosas con el medioambiente que beneficien a las poblaciones directamente afectadas por los emprendimientos energéticos” (Hubert y Spivak L’Hoste, 2021, p. 241). Desde este imaginario hay una fuerte crítica a los procesos productivos extractivistas y se promueve la participación de los actores involucrados en la definición, construcción y marcha de los proyectos energéticos. Los tres tipos de imaginarios propuestos por los autores pueden encontrarse reproducidos en alguno de los medios que analizaremos. Sin embargo, también puede emerger uno nuevo a partir del trabajo de campo.

Enfoque metodológico

Dada la naturaleza del problema de investigación que se ha planteado, el bagaje teórico-conceptual elegido y, el objeto de estudio construido se opta por seguir una lógica de investigación cualitativa. Esta lógica tiene su origen mucho antes que el enfoque estándar de investigación (lógica de investigación cuantitativa) y sus supuestos epistemológicos son la interpretación y la comprensión profunda de los

fenómenos. Se busca lo que Max Weber (1921) denominaba *Verstehen*, es decir, la comprensión de cada fenómeno en su particularidad (Bogdan y Taylor, 1987).

Las técnicas de recolección de la información se apoyaron en el análisis documental como estrategia metodológica de recolección de datos, a través de fuentes secundarias. A partir de la observación y la sistematización de la documentación se reconstruyó un corpus de textos noticiosos que se apoyó en un universo que incluía a todos las noticias que versaban explícitamente sobre TE en los paratextos de los medios salteños durante enero y junio del año 2023. El criterio para establecer la explicitación fue el registro de las palabras “Transición”, “Energía” “Litio” u otras relacionadas estrechamente. Los medios incluidos, a partir del criterio establecido, fueron “El Tribuno Salta”, “Infórmate Salta”, “Cuarto Poder Salta”, “Opinorte” y “FM Profesional”. El universo quedó conformado por 65 noticias que se constituyeron en unidades de análisis. El recorte temporal obedece a la necesidad de establecer, en un año electoral, el sentido sobre TE que circula entre los medios de comunicación. Se estima que ese sentido sobre TE en medios de comunicación se puede dar cuenta del horizonte de la agenda de discusión política. Las elecciones presidenciales en Argentina suelen tensionar discursos políticos sobre desarrollo y política energética, entre otros.

Se construyó un instrumento de registro (ver Tabla N°1) para sistematizar el corpus de noticias. La búsqueda se ejecutó a partir del navegador Google y, específicamente, en el archivo de cada medio de comunicación. Cada noticia, además, fue descargada en formato PDF y convertida en formato editable para el análisis.

Tabla N°1: Instrumento de Registro de Textos Noticiosos. Fuente: Elaboración propia.

N°	Título	Medio en el cual se publicó	Género periodístico
1	La pobreza energética en Argentina	Opinorte	Noticia
2	Hay Transición energética en Argentina	Cuarto Poder Salta	Columna de opinión
3	El Gobierno quiere potenciar las exportaciones de litio a Estados Unidos	Cuarto Poder Salta	Noticia
4	El potencial de Salta en la transición energética	El Tribuno Salta	Columna de opinión
5	Los cambios son rápidos y el nivel de adaptación del Gobierno no lo acompaña	El Tribuno Salta	Noticia
6	El litio es una oportunidad, pero podemos arruinarla	El Tribuno Salta	Columna de opinión
7	La transición energética llegó para quedarse	Infórmate Salta	Noticia
8	Cobre: Salta forma parte de los megaproyectos que ubicarían a la Argentina en el top 10 global	FM profesional	Noticia
9	Según Sáenz “la minería está cambiando la realidad de los salteños”	Opinorte	Noticia
10	Para Flavia Royón, Argentina necesita diversificar su matriz exportadora	Infórmate Salta	Noticia

El análisis de la información se apoyó en la codificación axial (Corbin y Strauss, 2015) y el análisis de contenido. Las noticias fueron codificadas mediante la utilización del software de análisis cualitativo de datos Atlas. Ti. Las categorías preseleccionadas se apoyaron en los tres imaginarios propuestos anteriormente: Mercantil, Justicia Socioambiental y Desarrollista. A priori, se diseñó un instrumento de frecuencia de aparición de referencias a cada código a partir del establecimiento de citas que determinaron la preponderancia de un imaginario u otro (ver Tabla N°2).

Durante el proceso de codificación, surgieron los siguientes inconvenientes: los imaginarios resultaron demasiado generales para analizar la particularidad de cada texto noticioso, ya que hacían referencia a demasiados aspectos que en los discursos mediáticos quedaban reducidos o fragmentados a cuestiones menores. Un ejemplo de esto es el imaginario de justicia socioambiental, que, si bien refiere a la participación de actores locales en la toma de decisiones sobre proyectos energéticos, también incorpora la democratización de la energía y la equidad en el acceso. En la codificación, fue tomado este último aspecto del imaginario, ya que en las noticias se determinaron discursos sobre el acceso a la energía y no tanto sobre la participación de los actores. Sucedió algo similar con el imaginario desarrollista. Este fue considerado en su aspecto que hace referencia al crecimiento del país o la provincia en relación con las ER, el desarrollo económico, la soberanía energética, y la relación del Estado con la TE. En cambio, al imaginario mercantilista se lo empleó en todo aquel discurso que mencionaba a la energía como bien de cambio, el mercado y las inversiones de capitales extranjeros.

Tabla N°2: Frecuencia de citas y códigos asociados a categorías preestablecidas (ejemplo parcial).

Fuente: Elaboración propia.

N°	Texto Noticioso	Códigos con mayor presencia	N° de Referencias	Imaginario de la justicia socioambiental	Imaginario mercantilista	Imaginario desarrollista
1	Noticia 1- La pobreza energética en Argentina	Imaginario de la justicia socioambiental Imaginario mercantilista	4	3	1	
2	Noticia 2-Hay Transición energética en Argentina	Imaginario de la justicia socioambiental Imaginario desarrollista	5	2		3
3	Noticia 3- El Gobierno quiere potenciar las exportaciones de litio a Estados Unidos	Imaginario mercantilista	6		6	
4	Noticia 4- El potencial de Salta en la transición energética	Imaginario mercantilista Imaginario desarrollista	2		1	1
5	Noticia 5- Los cambios son rápidos y el nivel de adaptación del Gobierno no lo acompaña	Imaginario desarrollista Imaginario mercantilista	7		4	3
7	Noticia 7-El litio es una oportunidad,	Imaginario mercantilista	9	1	3	5

	pero podemos arruinarla	Imaginario desarrollista				
		Imaginario de la justicia socioambiental				
8	Noticia 6- La transición energética llegó para quedarse	Imaginario desarrollista	5		2	3
		Imaginario mercantilista				

La presentación de los resultados se dispuso a partir de dos criterios: composición cuantitativa de cada código, es decir la frecuencia de citas en los textos noticiosos, y las formas en que circulan y se construyen los imaginarios sociotécnicos de TE (ver Tabla N°3).

Tabla N°3: Frecuencias de códigos y citas. Fuente: Elaboración Propia.

	Noticias	Códigos	Conteo de citas	Imaginario de la justicia socioambiental	Imaginario mercantilista	Imaginario desarrollista
Totales ordinales	65	3	203	33	81	89
Totales porcentuales			100	16,25	39,90	43,84

RESULTADOS

Nube de Sentidos

La nube de palabras (ver Figura N°1) con más presencia en el corpus da cuenta de un repertorio de argumentos desplegados en los textos noticiosos. Estos se apoyan en la repetición o insistencia de palabras con fuerte carga de sentido para la construcción y (re)producción de imaginarios de TE. El significado de “energía”, “Argentina”, “transición”, “litio” o “economía” dan soporte a los argumentos que compondrán los imaginarios presentados en los siguientes apartados.

Para la confección de la nube de sentidos, se desplegó una lista de exclusión propia debido a la necesidad de que surjan palabras en referencia al objeto de estudio. Se excluyeron palabras con errores tipográficos, preposiciones, verbos, pronombres, etc. Por ejemplo; *mi, agregó, a, bajo*, etc.

Esta nube de palabras, que se denominó “de sentidos”, expresa la carga de significados que le dan forma a los textos noticiosos que disputan los sentidos por hegemonizar los discursos de TE. Algunas de esas palabras resultan esperables: “Energía”, “Energética”, aquellas que refieren a tipos de fuente, etc. Sin embargo, y en línea con la emergencia de propuestas alternativas de TE, se observa que “pobreza” “hogares” y “acceso” también se asocian a cómo presentan la agenda de TE los medios alcanzados por este trabajo. Resulta importante que la pobreza energética y el acceso a la energía ocupen lugar destacado en los medios locales, considerando un marco generalizado nacional que presenta una agenda que prioriza la llegada de inversiones en el sector energético, la discusión de tarifas y las obras vinculadas con la minería.

“Pero, además, agrega el argentino entusiasta, el Estado va a regular este tema del litio, porque es estratégico. Van a limitar su exportación, imponer cupos de venta local a las empresas, quizás fijar precios o preferencias. Un Estado presente, para evitar una patria extractivista. ¡Todo eso te mejorará el precio y la facilidad de acceso al carbonato o hidróxido de litio!”. Y el inversor, entonces, abrirá grandes sus ojos y se irá a evaluar otros lugares, pensando que, si así tratan a los productores mineros, si algún día llegara a fabricar baterías me obligarán a fabricar autos eléctricos, o venderlas a precio regulado” (El Tribuno, 2023).

3) Nociones sobre un modelo de país apoyado en el valor agregado:

“Pero, además, agrega el argentino entusiasta, el Estado va a regular este tema del litio, porque es estratégico. Van a limitar su exportación, imponer cupos de venta local a las empresas, quizás fijar precios o preferencias. Un Estado presente, para evitar una patria extractivista. ¡Todo eso te mejorará el precio y la facilidad de acceso al carbonato o hidróxido de litio!”. Y el inversor, entonces, abrirá grandes sus ojos y se irá a evaluar otros lugares, pensando que si así tratan a los productores mineros, si algún día llegara a fabricar baterías me obligarán a fabricar autos eléctricos, o venderlas a precio regulado.” (El Tribuno, 2023).

Se observa en esta parte del corpus la hegemonía de un imaginario que postula al sector energético como un instrumento clave para el desarrollo económico e industrial del país. La visión política de la matriz energética tiene por objetivo la búsqueda de soberanía energética, pero también de independencia económica.

En esta instancia resulta clave retomar lo señalado anteriormente respecto a la asociación entre desarrollo y descarbonización. Los medios de comunicación vinculan, de manera novedosa, las nociones del desarrollismo como identidad política con la descarbonización. A priori se establecería la relación estrecha entre el imaginario de justicia socioambiental con la descarbonización. Sin embargo, los medios y los actores políticos referenciados en ellos invisibilizan los perjuicios del extractivismo y las denuncias promovidas desde los sectores que luchan contra el cambio climático. Esa invisibilización sostiene la noción de “crecimiento verde”, “sustentable” y “amigable con el ambiente”. Son pocas las voces que señalan los riesgos y la precariedad de ese discurso. Constantemente el gobierno provincial se pronuncia a favor de una TE “verde”, y la necesidad de que la sociedad se involucre y acepte el modelo de transición promovido.

Resulta necesario destacar la potencia de la reproducción de este imaginario para legitimar la implementación de políticas de desplazamiento de comunidades para la extracción de recursos. La TE, en Salta, está asociada con los reservorios de litio, producto clave para el almacenamiento y transporte de las ER (en el caso de la Provincia de Salta, principalmente la energía solar).

El mercado y las inversiones de capitales extranjeros como parte central de la TE

La frecuencia de nociones que vinculan la TE con el Mercado como actor central es casi tan alta como la del Imaginario Desarrollista. Con una presencia de 39,90% de citas codificadas como referencias del Imaginario Mercantil, aquí la TE presenta se vincula con estas nociones:

1) La necesidad del mercado de abastecerse de energía por el agotamiento de los recursos fósiles y la oportunidad de recibir inversiones:

“Además, existen a nivel país y provincial acciones concretas para fomentar las inversiones extranjeras en energías renovables, el mundo nos necesita” (El Tribuno, 2023).

“La presión sobre los recursos crecerá debido al aumento de la población mundial, la industrialización, la digitalización, la creciente demanda de los países en desarrollo y la transición energética hacia la neutralidad climática con metales, minerales y materiales utilizados en tecnologías y productos de bajas emisiones” (FM Profesional, 2023).

2) Modelo de Estado con la mínima intervención posible en el proceso de TE:

“Imaginemos un inversor que se dedica a producir baterías y le han comisionado que evalúe instalar una fábrica en el norte argentino. “Mi principal preocupación es saber si puedo confiar en la estabilidad jurídica y económica de este país para invertir miles de millones de dólares en instalar un negocio de tanto volumen y margen chico?”, diría este inversor.” (El Tribuno, 2023).

“En Bolivia, Evo Morales convenció a todos de que “no se llevarán nuestro litio si no es en un auto eléctrico boliviano”. Resultado: Bolivia no produce litio a nivel comercial a pesar de tener el salar más grande del mundo. Incluso en Chile, que hoy produce cerca del triple de litio que Argentina, las inversiones en desarrollos nuevos no avanzan porque la discusión del rol estatal, el esquema impositivo y los mecanismos para empujar la producción local de baterías, que llevan años, generaron incertidumbre. Hay que entender que el interés inversor en Argentina se explica porque, a pesar de los problemas macroeconómicos, el país no avanzó (al menos todavía) en imitar los modelos de estos vecinos del famoso triángulo. (El Tribuno, 2023)

3) Visión mercantilista de la producción, los avances científicos-tecnológicos y el consumo de energía:

“La gente no se da cuenta de lo que podemos generar en cuanto a ingreso como provincia en venta de energía” (Infórmate Salta, 2023).

“Por otro lado, las investigaciones científicas universitarias aportan al negocio minero conocimientos invaluable sobre los minerales económicos y su composición química. Estos estudios permiten definir el método de tratamiento óptimo aplicable, así como conocer el contenido en elementos minoritarios de interés económico en los concentrados (por ejemplo, Germanio, Indio, Tierras Raras), que incrementan el valor de comercialización de los concentrados.” (El Tribuno, 2023)

Este imaginario mercantil promueve la regulación libre del mercado como ordenador de las prioridades del proceso de TE. Los modelos propuestos dan cuenta de las intenciones que se relacionan con intereses del Norte Global que promueve una TE “sustentable” y “verde”. Ese modelo de TE ubica a los países del Sur Global en lugares periféricos, sin poder proponer alternativas más útiles en sus territorios.

Democratización de la energía y la equidad en el acceso como base de la TE

Los apartados de los textos noticiosos relevados que se incluyeron en esta categoría se corresponden con el imaginario de justicia socioambiental. La frecuencia de aparición de referencias asociadas con este imaginario es muy baja: apenas del 16,25% del total del corpus. La porción del sentido que aquí se presenta responde a la dimensión del concepto que promueve el acceso a la energía. En menor medida, emergen aquellos que puntualizan sobre la participación de los usuarios en las decisiones y la crítica al extractivismo:

“Argentina se caracteriza por obtener su energía a partir de combustibles fósiles. Es dependiente del petróleo, el gas y el carbón. Esto nos lleva a analizar la pobreza energética que se vive en el país ya que no se abordan políticas públicas integrales en esta temática. En el país vivimos una crisis climática que se hace cada vez más profunda y nos exige como sociedad realizar una transición hacia el uso de fuentes de energía limpias. Esto significa que en la sociedad existe una gran crisis ambiental por el uso de energías que son altamente contaminante para la sociedad, generando consecuencias en la salud y en el entorno de las comunidades.” (Cuarto Poder, 2023).

“La transición energética juega un papel importante y está en la agenda de la Secretaría de Energía por muchas razones. La transición energética debe ser llevada en un proceso justo, asequible y sostenible” (EL Tribuno, 2023).

“Ese plan de transición energética tiene que tener una consistencia social, macroeconómica y productiva” (El Tribuno, 2023).

“La transición ya empezó. Hay que replantearnos cómo generamos, cómo transportamos y cómo distribuimos la energía. Necesitamos avanzar con la electrificación y para eso necesitamos más redes que soporten más consumo, que sean más inteligente y la energía resulte más económica.” (Cuarto Poder, 2023).

“en la Provincia se trabaja coordinadamente con las comunidades de la Puna, cercanas a los proyectos mineros, a través de las Mesas Sociales” (Infórmate Salta, 2023).

Aunque este imaginario de TE se manifiesta como marginal en la disputa de sentidos por hegemonizar la agenda pública del proceso, los discursos se presentan con contenidos más elaborados. El contenido de los textos noticiosos encuadrados en este imaginario presenta un discurso más lógico en términos científicos y políticos: la necesidad de acceder a la energía como condición necesaria para la dignidad humana, pero en armonía con las propuestas que combaten el cambio climático.

Aquí emerge una vinculación del imaginario con la descarbonización como motor inicial del proceso de TE promovido por el Norte Global. Esta noción es incorporada (casi impuesta) en el Sur. Este modelo encuentra resistencias en la academia, algunos movimientos sociales y comunidades afectadas. En el Sur global la TE, desde el imaginario sociotécnico de justicia socioambiental, incorpora demandas locales que complejizan el proceso.

CONCLUSIONES

Los resultados dan cuenta de la hegemonía de nociones que vinculan imaginarios de TE con descarbonización, aunque distanciados de la versión de imaginario de justicia socioambiental. Esto se da en línea con una propuesta de descarbonización apoyada en los imaginarios desarrollista y mercantil. Esto distancia los resultados de la noción de *greenwashing* (españolizado como “lavado verde” o “ecoblanqueo”) que, a priori, establece el posicionamiento ecológico de una organización, mientras que sus acciones -las que no cuentan los medios- van en contra del medio ambiente (Galletti, 2021). De manera periférica, pero disputando sentidos alternativos, emergen nociones que relacionan la TE con la urgencia de garantizar el acceso a la energía. El trabajo reconoce la potencia de los medios como reproductores de nociones que responden a intereses disímiles entre las necesidades del Norte y del Sur Global.

Si este proceso de TE se propone en el marco de un nuevo estadio del capitalismo, como modo de producción y consumo, el Sur Global tiene asignado por el Norte el mismo lugar: el de las antes denominados colonias, luego países subdesarrollados o del tercer mundo, siempre proveedores a un modelo sociocultural foráneo.

Existen esfuerzos locales por complejizar el proceso de TE, ineludible y legítimo, pero con necesarias adecuaciones y reformulaciones en cada territorio. Si bien el imaginario sociotécnico a partir de la descarbonización, que es el modelo global dominante de TE, es el dominante en los medios de comunicación analizados, emergen intersticios que filtran demandas locales. Esto quedó claro en el análisis de la Nube de Sentidos y su correspondencia con el Imaginario de Justicia Socioambiental (el imaginario con menor frecuencia de referencias en los textos noticiosos).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación forma parte de los siguientes proyectos de investigación: 1) PICT-2020-SERIEA-01759. PICT categoría Inicial denominado “Política Pública y Desarrollo Científico-Tecnológico en Energías Renovables: Estrategias de Transición Sustentable en la Producción de Hábitat En Salta (2021-2023)” financiado por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica, y 2) Proyecto N°B2792/0 denominado “Sentidos Emergentes de Políticas Públicas y Desarrollos Científico-Tecnológicos Orientados a la Transición Sustentable: Derecho a la Energía, Pobreza Energética y Energías Renovables en la provincia Salta (2019-2023)” financiado por Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA).

Los autores agradecen la colaboración, el asesoramiento y las sugerencias del equipo de investigación de los proyectos que financian el trabajo.

REFERENCIAS

- Ariztía, T.; Boso, A. y Tiron, M. (2017). Sociología de la energía. Hacia una agenda de investigación. *Revista Internacional de Sociología*, 75(4), 1-7. <https://doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.07>
- Bertinat, P.; Chemes J. y Forero L. (2020). Transición energética. Aportes para la reflexión colectiva. Transnational Institute y Taller Ecologista.
- Bogdan, R. y Taylor, S. (1987). *Introducción a los Métodos Cualitativos de Investigación*. La búsqueda de significados. Paidós.
- Boyer, D. (2019). *Energopolitics. Wind and power in the anthropocene*. Duke University Press.
- Cornú, C.; Duran, P. A.; González, F.; Govetto, S.; Lazarte, M.; Mendieta Albarracín, B.; Miller, J.; Pedraza, M.; Villagra Yurovich, E.; Vilte, G. (2023). La transición energética como objeto de estudio ¿Qué pueden aportar las ciencias de la comunicación al estudio de este fenómeno? Experiencias en Salta (Argentina, 2023) [Mesa de Ponencia] XXVI Jornadas Nacionales de Investigadoras e Investigadores en Comunicación: Investigar en Comunicación. Un desafío necesario para el fortalecimiento de los procesos democráticos. Buenos Aires, Argentina.
- Corbin, J., & Strauss, A. (2015). *Basics of Qualitative Research, Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory* (4th Ed.). Sage Publications, Inc.
- Durán, P. A. (2023). Sentidos sobre la Transición Energética en Investigadores del campo del Hábitat y Energía: el caso del INENCO en Salta (2021-2022). *Pluriversos de la Comunicación*, 1(1), 104-123.
- Galletti, J. I. T (2021). *Greenwashing: Una aproximación crítica*. Boletín Informativo GJI. Año 5. UNLP. La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/>
- Garrido, S. (2022). Transición energética en Sudamérica. Discusión conceptual, políticas públicas y experiencias locales. Lenguaje Claro Editora.
- Gonza, C.; González, F. y Durán, P. (2022). Hábitat, Pobreza Energética y Mujeres Indígenas en el noroeste argentino: una propuesta interseccional para comunidades en zonas rurales aisladas del Chaco salteño. *Hábitat y Sociedad*, 15, 183-209. <https://doi.org/10.12795/HabitatySociedad.2022.i15.09>
- González, F.; Hessling, F.; Montone, M. (2022). Los estudios sociales de la energía y de la política energética desde el campo de la Comunicación: apuntes para una agenda de investigación emergente. *Cuadernos de la Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales*, 61, 65-185.
- González, F.; Duran, P. A. y Sarmiento Barbieri, J. (2023). Imaginarios de transición: el caso de la diplomatura en transición energética dictada por la UNSAM (2022). *UNAM Global Revista En prensa*].
- Gutiérrez Ríos, F. (2022). La transición energética en la prensa escrita argentina (2012-2019), en M. Svampa y P. Bertinat (Eds.), *La transición energética en Argentina* (1ª ed., pp.). Siglo XXI editores.
- Hubert, M. y Spivak L'Hoste A. (2021). Los imaginarios sociotécnicos de las políticas de producción de energía eléctrica en Argentina. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 6(47), 223-250.
- Jasanoff, S. y Kim, S.H. (2009). Containing the Atom: Sociotechnical Imaginaries and Nuclear Power in the United States and South Korea. *Minerva*, 47, 119-46.
- Kreimer, P. y Zabala, J. (2006). ¿Qué conocimiento y para quién? Problemas sociales, producción y uso social de conocimientos científicos sobre la enfermedad de Chagas en Argentina. *Redes*, 12(23), 49-78.
- Pedraza; M. y González, F. (2023). Imaginarios Sociotécnicos de Transición Energética en la Provincia de Salta. Una mirada desde los medios de comunicación [Mesa de Ponencia] XXVI Jornadas Nacionales de Investigadoras e Investigadores en Comunicación: Investigar en Comunicación. Un desafío necesario para el fortalecimiento de los procesos democráticos. Buenos Aires, Argentina.
- Santos, B. (2009). *Una epistemología del Sur: la reinención del conocimiento y la emancipación social*. México: Siglo XXI. CLACSO.
- Svampa, M. y Bertinat, P. (2022). *La transición energética en Argentina* (1ª edición). Siglo XXI editores.
- Weber, M. (1921). *Economía y sociedad*. FONDO DE CULTURA Económica.D.F. México. [ISBN 8437503744](https://doi.org/10.1017/9780520351570).pp. 306.

NOTIONS OF ENERGY TRANSITION IN SALTA: AN APPROACH TO HOW THE LOCAL MEDIA (2023) (RE)CONSTRUCT SENSES

ABSTRACT:

The objective of this paper is to analyze the notions of energy transition (re)produced by the media in the province of Salta. The period taken is the first semester of the year 2023. The category of socio-technical imaginary was used to address the notions related to energy transition manifested in the media. The study techniques were based on documentary research and axial coding as the basis of the methodological strategy for data collection and analysis, respectively. Based on the observation and systematization of the documentation, a corpus of news texts referring explicitly to the Energy Transition in the media paratexts was reconstructed. The results show the hegemony of notions that link transition imaginaries with decarbonization, although distanced from the version of socio-environmental justice. This is in line with a decarbonization proposal supported by developmentalist and mercantile imaginaries. In a peripheral way, but disputing alternative meanings, notions emerge that relate the transition to the urgency of guaranteeing access to energy. The work recognizes the power of the media as reproducers of notions that respond to dissimilar interests between the needs of the North and the global South.

Keywords: sociotechnical imaginary, energy transition, media.

ÍNDICE MULTIDIMENSIONAL DE POBREZA ENERGÉTICA PARA HOGARES TIPO BARRIO POPULAR: ENFOQUE DESDE EL ACCESO SEGURO, CALIDAD HABITACIONAL Y EQUIDAD ENERGÉTICA

Danae Franco Lopera¹, Rodrigo Durán¹, Miguel Ángel Condorí¹

¹Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales (INENCO) – Universidad Nacional de Salta (UNSa) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Tel. 0221-3562971 – e-mail: danaefrancolop@gmail.com

RESUMEN: Este trabajo se enfoca en el estudio de la pobreza energética en hogares con características similares a los de barrios populares en Argentina. Se desarrolló y evaluó un índice multidimensional de composición que considera aspectos como el acceso a la energía eléctrica, la seguridad en el acceso y uso final de energía, la calidad constructiva de la vivienda y la equidad en gastos energéticos. Se utilizaron principalmente las bases de datos del Registro Nacional de Barrios Populares (2017-2023) y la Encuesta Nacional de Gastos de Hogares (2017-2018). El indicador formulado permite cuantificar la pobreza energética en términos de intensidad tanto a nivel nacional como regional. Se observa una predominancia de la pobreza energética de intensidad media en los hogares tipo barrio popular de todo el país; no obstante, las regiones del norte mostraron mayor intensidad de pobreza energética, mientras que el Cuyo es simultáneamente la región con mayor porcentaje de hogares sin acceso a la electricidad y la segunda con mayor proporción de hogares sin pobreza energética de acuerdo al índice creado. Finalmente, el trabajo destaca la necesidad de políticas específicas basadas en las particularidades regionales y territoriales para abordar adecuadamente la pobreza energética en Argentina.

Palabras clave: pobreza energética, barrios populares, índice multidimensional

INTRODUCCIÓN

En general, existe un amplio consenso sobre la relación entre el acceso a la energía y el desarrollo humano; sobre todo al considerar la calidad de la energía, que abarca aspectos como su adecuación, fiabilidad y seguridad. Numerosos estudios respaldan esta afirmación, destacando que el acceso a fuentes de energía apropiadas es un habilitador fundamental del desarrollo socioeconómico de la población (Urquiza et al., 2019; Bradshaw, 2014).

Al estar presente en las esferas sociales y productivas, el uso de la energía condiciona el acceso a la cultura tecnológica contemporánea, siendo fundamental en las relaciones sociales y productivas; traducéndose en la expansión del acceso a derechos fundamentales como la educación, la salud y el empleo (Rodríguez, 2016; Aibar Puentes y Quintanilla, 2002). Estos planteos habilitan abordar estrategias y políticas de desarrollo energético desde una perspectiva de desarrollo e inclusión social de la población (Kozulj, 2015; Recalde, 2011; Omer, 2008).

Por otro lado, el avance del cambio climático ha intensificado la discusión respecto a la transición energética, enfatizando la importancia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, al analizar las condiciones de acceso a la energía para uso residencial se concluye que el modelo energético actual es insostenible, injusto y desigual (Calvo, 2021; Guzowski et al., 2021; Winkler, 2020). En este contexto, el concepto de Pobreza Energética (PE) resulta apropiado para estudiar y revertir la manera desigual en que se satisfacen los requerimientos energéticos de la población

(Pachauri y Spreng, 2011; Nussbaumer et al., 2012), considerando que el acceso equitativo a fuentes de energía seguras, efectivas, adecuadas y de calidad debe ser un derecho humano garantizado por los Estados (González-Eguino, 2015).

En el análisis de la PE se observan diversos enfoques para su estimación. Por un lado, indicadores basados en los ingresos destinados a cubrir los gastos energéticos del hogar (Durán y Condorí, 2021; Bouzarovski et al. 2012; Boardman, 1991). Por otro lado, en el contexto de las discusiones sobre la naturaleza multidimensional de la pobreza y su relación con las estrategias de desarrollo, el acceso a la energía se ha reconocido como una dimensión clave de la privación relativa (Bouzarovski y Petrova, 2015; Álvarez Leguizamón, 2008). Así, los índices multidimensionales enfatizan la importancia del uso social de la energía en contextos específicos (García Ochoa, 2014; Siksnyte-Butkiene et al., 2021).

No obstante, para el espacio urbano, ambos enfoques suelen suponer que el acceso a la energía se realiza de manera formal, lo que, para Argentina, termina por invisibilizar aproximadamente a 2.5 millones de personas sin conexión eléctrica formal en barrios populares, quienes están en condiciones de vulnerabilidad y pobreza, tanto estructural como energética (Franco Lopera et al., 2022). De acuerdo a su definición en el Decreto 358/2017, estos barrios son asentamientos y urbanizaciones informales que presentan déficit en el acceso formal a servicios básicos, precariedad, hacinamiento y una situación dominial irregular en la tenencia del suelo. De allí la necesidad de plantear, junto a Calvo et al. (2021), el análisis de la PE de manera situada, en función del contexto territorial y acorde a las necesidades y las formas de acceso a los servicios energéticos en los barrios populares.

Al respecto, Calvo et al. (2021) enfatizan, también, que el desarrollo de conceptualizaciones e indicadores de PE adecuados a la realidad de nuestra región contribuye a una mejor comprensión de los factores que influyen en el acceso equitativo a los servicios energéticos. Además, recomiendan considerar no sólo la marcada desigualdad en los gastos energéticos, sino también aspectos como la calidad y estabilidad del sistema eléctrico (muy por debajo de los estándares internacionales) y la calidad de la vivienda en términos de su eficiencia térmica.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una comprensión integral de la PE en hogares ubicados en áreas urbanas marginalizadas de Argentina. Para ello se construyó un índice multidimensional que permite evaluar la seguridad en el acceso a la energía, la calidad constructiva de la vivienda y el gasto energético equitativo. Al identificar patrones y disparidades regionales, la investigación busca proporcionar una visión de la prevalencia e intensidad de la PE. Además, el estudio utiliza datos del Registro Nacional de Barrios Populares y la Encuesta Nacional de Gastos de Hogares 2017-2018 para resaltar las proporciones significativas de la población que experimenta acceso informal a la energía, especialmente en contextos urbanos. La investigación enfatiza la necesidad imperiosa de políticas adaptadas al contexto para abordar la cuestión multifacética de la PE en Argentina.

METODOLOGÍA

En este estudio se utilizó como punto de partida la información obtenida del Registro Nacional de Barrios Populares (ReNaBaP), correspondiente al periodo 2017-2023, para identificar las principales modalidades de acceso a la electricidad y los tipos de combustibles utilizados en la cocción y calefacción. Este enfoque de investigación permitió revelar patrones regionales distintivos, tales como la marcada prevalencia del uso de leña para cocinar y calefaccionar en los Barrios Populares de las regiones de Cuyo, Noreste, Noroeste y gran parte de la Patagonia.

No obstante, es crucial reconocer que el registro realizado por ReNaBaP presenta ciertas limitaciones, ya que su unidad de análisis más pequeña es el barrio, lo que restringe la evaluación de factores como la calidad estructural de las viviendas o la composición familiar. Por ende, se recurrió a la Encuesta Nacional de Gastos de Hogares (ENGHo) correspondiente al periodo 2017-2018 con el fin de identificar hogares que compartieran características similares a los situados en los Barrios Populares.

Para este propósito, se diseñó una variable de sustitución basada en la definición operativa de Barrio Popular utilizada por el ReNaBaP, que establece que se trata de “*un conjunto de un mínimo de ocho*

familias agrupadas o contiguas, en donde más de la mitad de la población no cuenta con título de propiedad del suelo, ni acceso formal a al menos a dos de los servicios básicos: agua corriente, energía eléctrica con medidor domiciliario y/o sistema de eliminación de excretas a través de la red cloacal formal” (ReNaBaP, 2022). Esta variable permitió identificar hogares con modalidades de acceso a la tierra y los servicios básicos similares a los encontrados en estos barrios populares. No obstante, es importante destacar que la base de datos utilizada no permite evaluar la condición de agrupamiento en conjuntos de al menos 8 hogares contiguos y similares, por lo que se optó por enfocar el análisis en lo que se denominó *Hogares Tipo Barrio Popular*. Este enfoque permite considerar en el análisis las situaciones de vulnerabilidad energética en entornos con poca densidad habitacional, así como casos aislados emplazados en barrios no considerados por el ReNaBaP.

Para la construcción de la variable *Hogar Tipo Barrio Popular*, se siguió el esquema presentado en la Tabla 1. Se consideraron como tales a aquellos hogares que carecían de título de propiedad para sus terrenos de vivienda y que no tenían acceso formal a dos de los tres servicios básicos principales (agua corriente, electricidad y alcantarillado). Es importante señalar que la ENGHo no indaga explícitamente sobre formas de acceso informal, por lo que se utilizó la información de los gastos totales del hogar para identificar situaciones de acceso informal cuando un hogar estuviera registrado como conectado a una red de servicios (agua a través de red pública, electricidad y desagüe del inodoro a través de red pública), pero presentara un gasto nulo en las facturas relacionadas con dicho servicio.

Tabla 1: Construcción de variable Hogar Tipo Barrio Popular

CONDICIONES ReNaBaP			FORMA DE EVALUACIÓN (Base ENGHo 2017/2018)	
			Código	Pregunta
Vivienda SIN título de propiedad del terreno			CH03	Escritura vivienda
2 de 2 Vivienda SIN acceso formal a redes de servicios básicos	2 de 3	SIN conexión formal a red de agua corriente	CH09	Obtención agua
			A041101	Gasto agua corriente
		SIN energía eléctrica formal con medidor domiciliario	CH07	Acceso a electricidad
			A0451101	Gasto electricidad
		SIN eliminación de excretas mediante red cloacal	CH14	Desagüe de inodoro
			A0443101	Gasto Cloacas y desagües pluviales
Al menos 8 familias contiguas o agrupadas donde al menos la mitad cumple ambas condiciones			No se considera	

Construcción del índice

Para analizar las condiciones de pobreza energética se evaluaron cuatro dimensiones: acceso a la electricidad, seguridad en el acceso y uso final de la energía, calidad constructiva de la vivienda y gastos totales destinados a combustibles y servicios energéticos en relación a los ingresos totales del hogar.

En particular se ha optado por un índice multidimensional por composición. Por lo general, este tipo de índices están compuestos por indicadores que refieren a distintas dimensiones de un mismo problema, de allí su nombre. Los índices compuestos destacan por su facilidad de interpretación en comparación con la búsqueda de una tendencia común en varios indicadores independientes. Por esta razón son muy utilizados en el análisis de políticas públicas, ya que pueden condensar conceptos complejos y escurridizos (Nardo y Saisana, 2009; Greco et al., 2018).

Este tipo de índices se construyen al combinar todas las dimensiones, objetivos, indicadores individuales y variables que se emplean en su elaboración. En su forma estándar, un índice compuesto se define de la siguiente manera:

$$I = \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i \quad (1)$$

Donde x_i representa una variable que ha sido ajustada y normalizada, mientras que w_i corresponde al peso asignado a esa variable. Esta formulación del indicador implica una agregación lineal de las variables, el cual no es el único método de agregación posible (Camacho y Horta, 2020).

El peso o ponderación asignada a cada variable es una cuestión fundamental en la formulación de índices compuestos. En general, los índices con ponderaciones diferentes para cada una de sus variables son referidos como “índices sintéticos” y el nombre “índices por composición” suele reservarse para aquellos construidos mediante la asignación de pesos iguales a todas las variables (Durán y Condorí, 2021). Estos últimos son más comúnmente utilizados en contextos en los cuales no hay suficiente evidencia teórica o empírica que justifique la ponderación diferencial entre una y otra variable, o, simplemente, debido a su sencilla formulación.

Particularmente en el caso de interés, se ha optado por un indicador con ponderación homogénea en función de las características propias de la población estudiada y la necesidad de evidenciar equitativamente las diferentes dimensiones identificadas para la pobreza energética en contextos como los de los Barrios Populares. Esto se alinea con trabajos recientes, en los que el estudio multidimensional de la PE en Latinoamérica suele realizarse mediante índices e indicadores similares a los acá propuestos. (Schirmer Soares et al., 2023; Calvo et al., 2021)

Dimensiones evaluadas

Para la formulación del índice, se han tomado en consideración cuatro dimensiones de análisis. Inicialmente, se ha llevado a cabo un análisis de la disponibilidad de servicios eléctricos en los hogares, independientemente de la naturaleza de la conexión. En aquellos casos en los que no se dispone de conexión eléctrica alguna, se asume automáticamente que el hogar se encuentra en una situación de Pobreza Energética y, en consecuencia, las restantes dimensiones no son objeto de evaluación. Por consiguiente, se ha designado al acceso a la electricidad como la dimensión basal, correspondiente a la dimensión cero de análisis.

Tabla 2: Dimensiones de evaluación del índice

DIMENSIÓN		FORMA DE EVALUACIÓN		
0	Acceso a la Electricidad	Si no tiene NINGÚN TIPO DE ACCESO al servicio eléctrico se considera en situación de pobreza energética		
1	Inseguridad en el acceso a la energía	1 de 2	Según combustibles y fuentes energéticas	
			2 de 3	Servicio eléctrico inseguro
				Combustible para cocinar inseguro
		Combustible para calefaccionar inseguro		
		2 de 3	Según uso final y equipamientos del hogar	
			Cocción de alimentos insegura	
Agua caliente sanitaria insegura				
2	Vivienda de baja calidad constructiva	2 de 6	Material de Techo Ineficiente	
			Ausencia de Cielorraso	
			Material de Piso Ineficiente	
3	Hogar con ingresos bajos o con alto costo energético (Equidad)	1 de 2	Material de Paredes Ineficiente	
			Ausencia de Revoque Exterior	
			Ausencia de Revoque Interior	
3	Hogar con ingresos bajos o con alto costo energético (Equidad)	1 de 2	Relación entre ingresos y gastos energéticos es mayor a dos veces la mediana regional	
			El hogar está por debajo de la línea de pobreza regional por ingresos	

Como se mencionó previamente, en el contexto de los barrios populares es esencial considerar que las condiciones de acceso a la energía y su aplicación final se amalgaman, dando lugar a un aumento en los riesgos y las posibilidades de accidentes. Por esta razón, la primera dimensión que se ha abordado es la Inseguridad en el acceso a la energía en los hogares. Esta cuestión ha sido evaluada desde dos enfoques distintos, en donde si se cumple cualquiera de las dos condiciones, se considera al hogar vulnerable en esta dimensión:

- Primero, se ha evaluado en función de los combustibles empleados para la cocción y la calefacción de las viviendas, además de la seguridad en el acceso a la electricidad. En este punto,

se ha prestado particular atención a los combustibles de mayor prevalencia en los hogares, calificando como inseguros aquellos que utilizan leña, carbón, kerosene y electricidad obtenida a través de conexiones informales. Si el hogar presenta un acceso inseguro a dos de estas tres fuentes energéticas (servicio eléctrico, combustible utilizado para cocinar y combustible usado para calefaccionar), se considera que su acceso a la energía es inseguro según los combustibles y fuentes energéticas.

- En segundo lugar, se ha evaluado según el uso final de la energía, tomando en cuenta los dispositivos empleados para la obtención de agua caliente sanitaria, la cocción de alimentos y la calefacción del hogar. Para ello, se ha empleado el módulo de equipamiento del hogar de la ENGHo. En esta base de datos, se han asignado distintos niveles de seguridad a los dispositivos utilizados por los hogares para los tres propósitos mencionados, considerando el contexto de su utilización. Ejemplos de usos finales inseguros incluyen el uso de duchas eléctricas en hogares con conexiones eléctricas informales, la calefacción mediante estufas alimentadas por gas de garrafa y la cocción con hornos de leña. Si el hogar presenta dos usos finales inseguros de energía (de los tres evaluados), se considera que su utilización de la energía es insegura.

Es importante destacar que la falta de acceso seguro a la energía en los hogares puede constatararse a través de cualquiera de los dos métodos descriptos; esto ha sido necesario debido a que el módulo de equipamiento del hogar de la ENGHo no ha sido contestado en su totalidad en todos los hogares encuestados.

Tabla 3: Prevalencia de características de la vivienda según región y cantidad de deficiencias constructivas consideradas

		MATERIAL PISO INEF.	MATERIAL PARED INEF.	MATERIAL TECHO INEF.	VIVIENDA SIN CIELORRASO	VIVIENDA SIN REVOQUE EXTERNO	VIVIENDA SIN REVOQUE INTERNO
	Región	% Hog. Reg.	% Hog. Reg.	% Hog. Reg.	% Hog. Reg.	% Hog. Reg.	% Hog. Reg.
1 CONDICIÓN	Cuyo	2.89%	0.00%	29.38%	60.35%	0.00%	7.39%
	Metropolitana	11.63%	0.00%	52.81%	28.53%	2.47%	4.56%
	Noreste	7.35%	0.00%	82.56%	1.15%	5.62%	3.33%
	Noroeste	12.18%	0.00%	70.64%	11.22%	2.71%	3.24%
	Pampeana	0.74%	0.00%	63.29%	21.08%	8.34%	6.56%
	Patagonia	1.63%	0.69%	88.05%	2.94%	4.59%	2.10%
	TOTAL PAÍS	7.60%	0.05%	61.01%	22.24%	4.32%	4.77%
2 CONDICIONES	Cuyo	59.65%	3.69%	7.82%	36.37%	36.66%	55.81%
	Metropolitana	44.98%	0.00%	58.10%	56.75%	26.56%	13.62%
	Noreste	35.38%	2.84%	93.87%	30.02%	28.05%	9.84%
	Noroeste	38.51%	0.61%	76.28%	56.10%	21.08%	7.42%
	Pampeana	26.89%	0.51%	89.92%	51.40%	22.90%	8.39%
	Patagonia	19.21%	33.34%	94.25%	14.63%	23.57%	14.99%
	TOTAL PAÍS	39.60%	1.71%	68.99%	51.76%	25.57%	12.36%
3 CONDICIONES	Cuyo	44.64%	0.00%	83.50%	67.03%	62.31%	42.52%
	Metropolitana	79.70%	4.89%	75.09%	76.69%	30.93%	32.70%
	Noreste	78.90%	5.39%	100.00%	54.17%	48.19%	13.36%
	Noroeste	74.63%	2.74%	79.49%	72.69%	43.66%	26.79%
	Pampeana	73.59%	0.00%	82.21%	80.51%	32.03%	31.66%
	Patagonia	43.17%	69.51%	95.92%	30.60%	57.07%	3.73%
	TOTAL PAÍS	75.78%	5.80%	81.25%	72.48%	36.13%	28.57%

La segunda dimensión de análisis aborda la calidad constructiva de la vivienda. Se pretende de este modo, evaluar la eficiencia térmica de la misma a través de los materiales predominantes en la construcción del techo, paredes y suelo de la vivienda, así como la ausencia de elementos como cielorrasos y revoque interno y externo en las paredes. Los materiales que se han considerado deficientes para el techo abarcan: chapas metálicas sin recubrimiento, chapas de cartón, caña, palma, tablas y paja. En cuanto a las paredes, se han catalogado como de baja calidad aquellas construidas con madera, chapas metálicas o de fibrocemento, cartón, palma, paja y materiales de desecho. En relación al piso de la vivienda, se ha considerado que aquel compuesto por tierra o ladrillos sueltos, así como cemento sin la presencia de baldosas, no solo representa en sí mismo una deficiencia constructiva, sino que además permite inferir que el resto de la vivienda también cuenta con tales falencias.

Mediante un análisis de correlación, se ha determinado que los pisos con materiales de baja calidad constructiva suelen estar relacionados con la ausencia de cielorraso (0,48), la falta de revoque interno (0,46) y la carencia de revoque externo (0,45). Además, en la Tabla 3 se presentan los resultados de un análisis que mide cómo se distribuyen estas variables cuando se cumplen 1, 2 o 3 de las condiciones constructivas evaluadas. Se observa que, en la mayoría de los casos (61,01%), cuando una vivienda de un hogar Tipo Barrio Popular presenta una de las 6 deficiencias constructivas consideradas, esta deficiencia corresponde a los materiales del techo. Esta incidencia aumenta a más del 80% para las regiones del Noreste y la Patagonia. Es importante destacar que, cuando se encuentran dos de estas características, lo más común es encontrar techos construidos con materiales ineficientes térmicamente (69%), cielorraso ausente (51,8%) o pisos de tierra o cemento sin baldosas (39,6%)¹. Finalmente, cuando se encuentran tres deficiencias constructivas, la incidencia de estas mismas tres características (material del techo, material del piso y ausencia de cielorraso) aumenta a más del 70% para cada una de ellas. Para los casos con 4, 5 o 6 características, esta tendencia se mantiene y gradualmente se incrementa la incidencia de las otras tres características consideradas. Con base en estos resultados, se ha determinado que una vivienda tiene baja calidad constructiva cuando presenta al menos dos de las seis características evaluadas.

Finalmente, la tercera dimensión de análisis se centra en la equidad, entendida en términos de los umbrales económicos que dificultan el acceso a servicios energéticos de calidad (Calvo et al., 2021). Esta dimensión ha sido evaluada, inicialmente, mediante el cálculo de la proporción entre el conjunto de gastos energéticos del hogar y sus ingresos totales. Los gastos energéticos considerados abarcan, además de las facturas mensuales por servicios de electricidad y gas de red (si las hubiere), el costo de garrafas de gas envasado y los combustibles como leña, carbón y otros utilizados por el hogar durante el mes. Para llevar a cabo esta evaluación, se ha empleado el índice 2M, el cual considera problemáticas aquellas situaciones en las que la mencionada proporción excede el doble de la mediana regional establecida en dicha relación (Durán y Condorí, 2019). En la Tabla 4 se muestran los resultados de evaluar dicho índice para el total de hogares de la ENGHo y para aquellos Tipo Barrio Popular. Llama la atención que, en la mayoría de las regiones, los hogares Tipo Barrio Popular tienen una menor incidencia de PE medida a través del índice 2M regional. Esta tendencia sólo cambia para las regiones Metropolitana y Noroeste, que son también las regiones con menor incidencia de conexiones eléctricas informales en este tipo de hogares (38% y 15% respectivamente).

Se ha optado, entonces, por evaluar de dos maneras distintas la dimensión de equidad (siendo necesario que se cumpla sólo una de las dos):

- Si el hogar tiene una relación entre ingresos totales y gastos energéticos totales mayor a 2 veces la mediana regional.
- Si los ingresos totales del hogar se encuentran por debajo de la línea de pobreza regional al momento de realizar la encuesta.

¹ Los porcentajes no suman 100% debido a que varias condiciones pueden coexistir.

Esta adición tiene por finalidad abordar la dificultad metodológica que implica el índice 2M cuando un hogar carece de registros de gastos energéticos debido a la falta de conexiones formales y/o la utilización de biomasa recolectada del entorno.

Tabla 4: Evaluación de Indicador de PE 2M regional según su aplicación en todos los hogares de la Base ENGHo y sólo en los Hogares Tipo BP de la misma base.

	HOGARES EN PE SEGÚN INDICADOR 2M REGIONAL				
	<i>Base ENGHo Completa</i>		<i>Sólo Hogares tipo BP (Filtrados de Base ENGHo)</i>		
Región	Total	% Región	Total	% Región	
<i>Cuyo</i>	168.334	21,70 %	4.392	13,15 %	↓
<i>Metropolitana</i>	1.132.385	24,10 %	220.193	30,49 %	↑
<i>Noreste</i>	182.389	19,70 %	10.762	9,69 %	↓
<i>Noroeste</i>	208.747	18,00 %	22.349	20,37 %	↑
<i>Pampeana</i>	806.571	19,30 %	47.348	15,00 %	↓
<i>Patagonia</i>	171.445	24,10 %	5.388	8,87 %	↓
TOTAL PAÍS (Cantidad de hogares en PE)	2.669.871	21,15 %	310.432	22,95 %	↑

En la Tabla 2 se sintetizan las dimensiones evaluadas en el índice, así como las variables correspondientes empleadas en cada una de ellas. El índice desarrollado se caracteriza por ser acumulativo, lo que posibilita la determinación de la intensidad de la Pobreza Energética en un hogar con base en la cantidad de dimensiones en las que se evidencian condiciones de vulnerabilidad. Los niveles identificados en el índice abarcan desde la ausencia de Pobreza Energética (cuando las vulnerabilidades se sitúan por debajo de los umbrales en todas las dimensiones) hasta Pobreza Energética de grado bajo, medio y alto (para uno, dos y tres dimensiones afectadas, respectivamente). Adicionalmente, se contempla la situación más crítica, que se presenta cuando no se dispone de ninguna forma de acceso al servicio eléctrico.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos para el índice diseñado. El mismo ha sido evaluado sólo en los hogares Tipo Barrio Popular a nivel nacional y regional. Se observa que, a nivel nacional, el índice multidimensional de PE permite estimar que más del 63% de los hogares tipo Barrio Popular se encuentran en una situación de pobreza energética de intensidad media o alta, y que aproximadamente el 0,65% carecen de acceso a la electricidad.

Al comparar los resultados a nacionales con los de la Región Metropolitana, se hace evidente que, debido a la marcada diferencia en la densidad poblacional entre el Gran Buenos Aires y otras zonas del país, los análisis llevados a cabo a nivel nacional tienden a enmascarar estas particularidades al ser más representativos de la Región Metropolitana. Investigaciones anteriores han permitido establecer que las condiciones de vulnerabilidad energética en los Barrios Populares de Argentina exhiben disparidades significativas entre distintas regiones (Franco Lopera et al., 2022). Por este motivo, todos los resultados acá presentados priorizan la descripción regional.

Asimismo, es importante señalar que un análisis a nivel provincial resulta impracticable con la metodología presentada en este estudio. Esto se debe a que la cantidad de encuestas realizadas por la ENGHo en hogares representativos de Barrios Populares varía significativamente entre las distintas provincias del país, llegando a niveles mínimos en provincias como La Rioja, San Luis y La Pampa.

Por el contrario, el análisis basado en regiones ha demostrado ser un punto intermedio muy efectivo, mostrando al mismo tiempo porcentajes de hogares representativos de barrios populares que son

notablemente congruentes con los cálculos derivados de las Bases del ReNaBaP (como se evidencia en la Tabla 5). No obstante, la cantidad de hogares Tipo Barrio Popular no necesariamente debe coincidir con la cifra total de hogares presentes en Barrios Populares. Esta disimilitud obedece, en primer lugar, al hecho de que no todos los hogares con acceso informal a los servicios básicos y posesión no regularizada de los terrenos se encuentran agrupados en barrios populares. Además, en segundo término, no todos los hogares ubicados en barrios populares presentan idénticas condiciones de acceso a terrenos y servicios básicos.

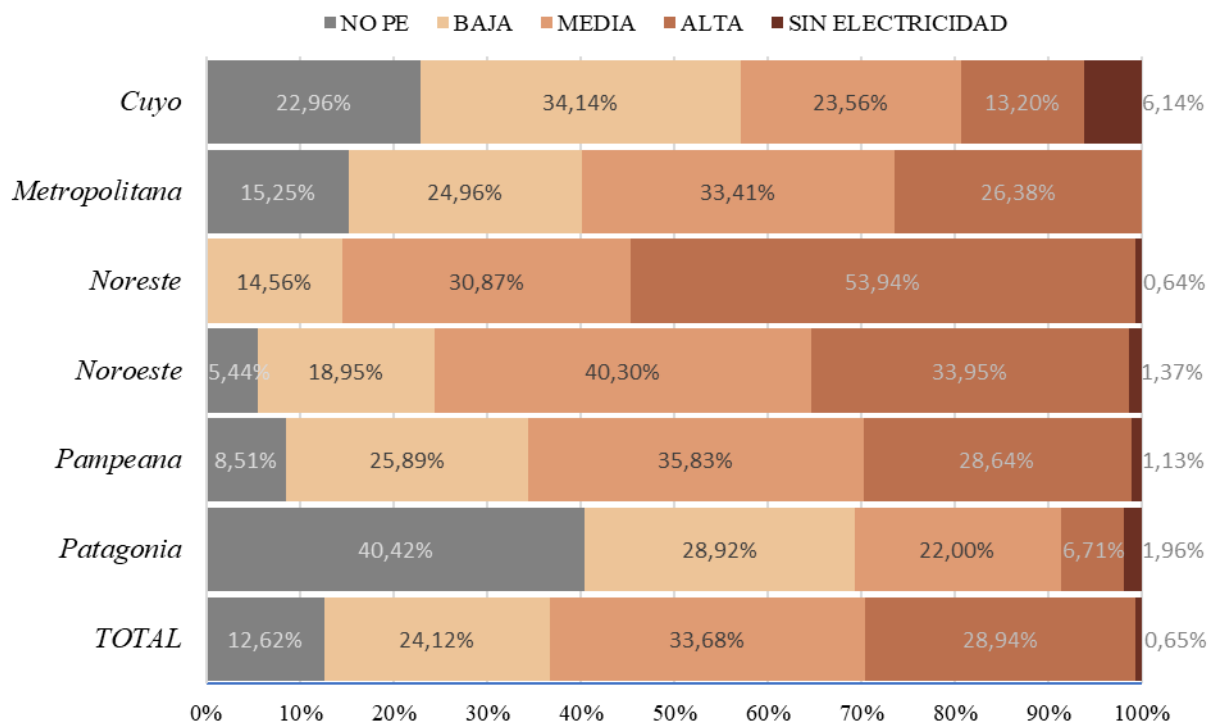


Figura 1: Intensidad de PE según indicador multidimensional creado para hogares tipo barrio popular en cada región de Argentina.

Se observa que en la mayoría de las regiones prevalece la incidencia de PE de intensidad media en los hogares tipo barrio popular. Una excepción notable es la región Patagónica, donde casi la mitad de dichos hogares presenta niveles bajos de pobreza energética. En contraste, la región del Cuyo exhibe una marcada desigualdad energética, ya que alberga la mayor proporción de hogares desprovistos de cualquier forma de acceso al servicio eléctrico, en simultáneo con casi un 23% de hogares clasificados como “sin condiciones de PE” de acuerdo al índice desarrollado.

Tabla 5: Comparación entre hogares en barrios populares (según base ReNaBaP) y hogares tipo barrio popular (según base ENGHo)

Región	HOGARES EN BARRIOS POPULARES (Base ReNaBaP)		HOGARES TIPO BARRIO POPULAR (Base ENGHo)		TOTAL HOGARES REGIÓN (Base ENGHo)
	Total	% Región	Total	% Región	
Cuyo	35.033	4,49 %	33.389	4,28 %	780.368
Metropolitana	545.648	11,37 %	722.134	15,05 %	4.797.669
Noreste	157.686	16,93 %	111.013	11,92 %	931.176
Noroeste	114.008	9,78 %	109.724	9,41 %	1.165.960
Pampeana	257.701	6,09 %	315.634	7,46 %	4.228.997
Patagonia	58.655	7,94 %	60.746	8,23 %	738.355
TOTAL PAÍS	1.168.731	9,24 %	1.352.640	10,70 %	12.642.525

La región Noreste (NEA) se caracteriza por contar con una gran mayoría de hogares que experimentan pobreza energética de intensidad media y alta, sumando conjuntamente más del 70% de los hogares Tipo Barrio Popular. La región Noroeste (NOA) le sigue de cerca, con estos hogares comprendiendo un poco más del 67% del total. Es relevante mencionar que la región Noreste (NEA) también sobresale por tener el mayor porcentaje de hogares en situación de Pobreza Energética alta, alcanzando casi un 54% de los hogares estudiados.

Cabe resaltar que, aunque esta metodología no ha registrado hogares sin acceso a la electricidad en la Región Metropolitana, análisis anteriores basados en el ReNaBaP han evidenciado la presencia de hogares en tales condiciones en dicha región (Franco Lopera et al., 2022).

Tabla 6: Composición de las dimensiones evaluadas según intensidad de PE y distribución regional y nacional para Hogares Tipo BP.

	Región	SIN ACCESO A ELECTRIC.		VIVIENDA DE BAJA CALIDAD CONST.		INSEGURIDAD EN EL ACCESO A LA ENERGÍA		INGRESOS BAJOS O ALTO COSTO ENERGÉTICO		TOTAL HOG. REGIÓN CON IGUAL INTENS. DE PE	
		Hog.	% Reg.	Hog.	% Reg.	Hog.	% Reg.	Hog.	% Reg.	Hog.	% País
PE BAJA - 1 COND	Cuyo	0	0.00%	1301	12.23%	2445	22.99%	6889	64.78%	10635	3.52%
	Metropolitana	0	0.00%	12229	7.20%	90918	53.54%	66665	39.26%	169812	56.19%
	Noreste	0	0.00%	517	3.22%	15532	96.78%	0	0.00%	16049	5.31%
	Noroeste	0	0.00%	670	3.36%	16873	84.64%	2393	12.00%	19936	6.60%
	Pampeana	0	0.00%	2361	3.22%	48591	66.28%	22361	30.50%	73313	24.26%
	Patagonia	0	0.00%	2834	22.73%	3001	24.07%	6632	53.20%	12467	4.13%
	TOTAL PAÍS	0	0.00%	19912	6.59%	177360	58.69%	104940	34.72%	302212	100%
PE MEDIA - 2 COND	Cuyo	0	0.00%	3715	50.62%	7339	100.00%	3624	49.38%	7339	1.74%
	Metropolitana	0	0.00%	120612	53.06%	192618	84.74%	141366	62.19%	227298	53.86%
	Noreste	0	0.00%	19795	58.16%	33623	98.80%	14648	43.04%	34033	8.06%
	Noroeste	0	0.00%	24344	57.42%	39224	92.51%	21230	50.07%	42399	10.05%
	Pampeana	0	0.00%	40372	39.78%	99793	98.34%	62789	61.88%	101477	24.05%
	Patagonia	0	0.00%	5915	62.37%	4878	51.44%	8173	86.19%	9483	2.25%
	TOTAL PAÍS	0	0.00%	214753	50.89%	377475	89.44%	251830	59.67%	422029	100%
PE ALTA - 3 COND	Cuyo	0	0.00%	4112	100.00%	4112	100.00%	4112	100.00%	4112	1.13%
	Metropolitana	0	0.00%	179427	100.00%	179427	100.00%	179427	100.00%	179427	49.46%
	Noreste	0	0.00%	59478	100.00%	59478	100.00%	59478	100.00%	59478	16.40%
	Noroeste	0	0.00%	35716	100.00%	35716	100.00%	35716	100.00%	35716	9.85%
	Pampeana	0	0.00%	81112	100.00%	81112	100.00%	81112	100.00%	81112	22.36%
	Patagonia	0	0.00%	2892	100.00%	2892	100.00%	2892	100.00%	2892	0.80%
	TOTAL PAÍS	0	0.00%	362737	100%	362737	100%	362737	100%	362737	100%
SIN LUZ	Cuyo	1913	100.00%	1913	86.48%	1913	86.48%	1913	86.48%	1913	23.60%
	Metropolitana	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
	Noreste	702	100.00%	702	100.00%	702	100.00%	49	6.98%	702	8.66%
	Noroeste	1440	100.00%	1246	86.53%	883	61.32%	867	60.21%	1440	17.76%
	Pampeana	3207	100.00%	3207	100.00%	3207	100.00%	215	6.70%	3207	39.56%
	Patagonia	845	100.00%	440	52.07%	405	47.93%	405	47.93%	845	10.42%
	TOTAL PAÍS	8107	100%	7508	92.61%	7110	87.70%	3449	42.54%	8107	100%

La Tabla 6 muestra la composición de la PE para cada valor de intensidad (baja, media, alta y hogares sin electricidad). Para hacer más accesible la lectura y comprensión de estos datos, se han incluido también los gráficos radiales de la Figura 2. Los porcentajes se han calculado teniendo en cuenta tanto la región como el nivel de intensidad. Por ejemplo, en el caso de los hogares del tipo Barrio Popular con una baja intensidad de Pobreza Energética, en las regiones de Cuyo y Patagonia, la dimensión predominante se refiere a altos costos energéticos y bajos ingresos familiares (64,64% y 53,20% respectivamente). Sin embargo, en el resto del país, la principal dimensión vulnerada en hogares con PE de baja intensidad es la inseguridad en el acceso a la energía. Nótese que, en la Figura 2, heptágonos más regulares corresponden a situaciones más homogéneas en las diferentes regiones y viceversa.



Figura 2: Distribución regional de las dimensiones evaluadas según intensidad.

Al analizar la composición de la PE de intensidad media, se observa que la inseguridad en el acceso a la energía es la dimensión de mayor incidencia en todas las regiones, excepto en la Patagonia, donde es mucho más preponderante la inequidad en los costos (86%) y las condiciones deficientes de construcción de la vivienda (62%).

Este tipo de análisis se vuelve tautológico para el caso de PE alta, ya que por definición todos los hogares en esta situación presentan vulnerabilidad en las tres dimensiones. No obstante, resulta interesante revisar la composición para hogares sin ningún tipo de acceso a la electricidad, ya que se puede observar como la dimensión de costos pierde mucha relevancia frente a las condiciones constructivas de las viviendas y la seguridad en el acceso y uso final de los combustibles y fuentes energéticas.

Adicionalmente, la columna final de la Tabla 6 permite revisar la distribución a nivel nacional de los hogares tipo BP según el nivel de intensidad de PE medida. Así se verifica que la región metropolitana alberga el mayor porcentaje de los hogares para todas las intensidades consideradas, pero la Región Pampeana tiene la mayor cantidad de hogares sin ningún tipo de acceso a la energía eléctrica.

CONCLUSIONES

En resumen, el presente estudio ha abordado con profundidad la problemática de la PE en los hogares con características similares a aquellos localizados en Barrios Populares de Argentina. A través de la construcción de un índice multidimensional, y la aplicación de una metodología novedosa, se han evaluado cuatro dimensiones clave: la falta de acceso al servicio eléctrico, la inseguridad en el acceso y uso final de las fuentes energéticas, la baja calidad constructiva de las viviendas y la inequidad en relación a los gastos energéticos. Estas dimensiones han permitido una comprensión más completa y precisa de la pobreza energética, considerando no solo la disponibilidad de servicios básicos, sino también las condiciones de habitabilidad y la equidad en su acceso.

Los resultados obtenidos han revelado patrones distintivos en las diferentes regiones del país. Si bien la mayoría de las regiones presentan prevalencia de PE de intensidad media en los hogares Tipo Barrio Popular, se han destacado particularidades significativas. La región Patagónica se diferencia por su menor incidencia de pobreza energética baja, mientras que la región del Cuyo se distingue por una marcada desigualdad energética y un mayor porcentaje de hogares sin acceso al servicio eléctrico. Las regiones NOA y NEA destacan por su alto porcentaje de hogares con pobreza energética, especialmente en su forma más severa.

La investigación ha permitido también evidenciar las limitaciones metodológicas en la evaluación de la pobreza energética a nivel provincial, debido a la disparidad en la cantidad de encuestas realizadas en hogares tipo barrio popular en diferentes provincias. Esto subraya la importancia de considerar las particularidades regionales al abordar la pobreza energética y sus desafíos asociados.

En conclusión, este estudio ha contribuido de manera significativa a la comprensión de la PE en los hogares de barrios populares en Argentina. Los hallazgos subrayan la necesidad de implementar políticas y programas específicos que aborden las diversas dimensiones de la pobreza energética en función de las realidades regionales. Asimismo, se resalta la relevancia de investigaciones futuras que profundicen en la caracterización de la PE a nivel local y la identificación de soluciones concretas para mejorar las condiciones de vida de los hogares más vulnerables en términos energéticos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a la Organización FUNDAR que financió gran parte de la investigación acá presentada mediante la Beca FunDatos; asimismo, al equipo de la Sede Salta de TECHO que participó activamente en las indagaciones en territorio, al Centro de Investigación e Innovación de TECHO Argentina, y a la Secretaría de Integración Socio Urbana del Ministerio de Desarrollo Social por facilitar el acceso a las bases de datos del ReNaBaP y resolver las dudas que surgieron en el proceso.

REFERENCIAS

- Aibar Puentes, E. y Quintanilla, M.A. (2002). *Cultura tecnológica: Estudios de ciencia, tecnología y sociedad*. Universitat de Barcelona. Institut de Ciències de l'Educació & Horsori.
- Álvarez Leguizamón, S. (2008). *Pobreza y desarrollo en América Latina*. Salta: Editorial UNSa.
- Boardman, B. (1991). *Fuel poverty: From cold homes to affordable warmth*. Pinter Pub Limited
- Bouzarovski, S. y Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31-40.
- Bouzarovski, S.; Petrova, S. y Sarlamanov, R. (2012). Energy poverty policies in the EU: A critical perspective. *Energy Policy*, 49, 76-82.
- Bradshaw, J. (2014). *Energy and Social Policy (Routledge Revivals)*. Routledge.
- Calvo, R., Álamos, N., Billi, M. y Urquiza, A. (Edit.) (2021), *Desarrollo de indicadores de Pobreza Energética en América Latina y El Caribe*. CEPAL.
- Camacho, M. y Horta, R. (2020). *Metodologías para la Construcción de Índices Compuestos*. UCU.
- Durán, R. J., y Condorí, M. Á. (2019). *Pobreza energética en la Argentina urbana*. AVERMA, 23.
- Durán y Condorí, 2021. Alcance de la tarifa social sobre los hogares en situación de pobreza energética de la Argentina urbana en el periodo 2016 – 2018. *Estudios Socioterritoriales*; 29; 25-6-2021; 1-28

- FrancoLopera, D., Durán, R., y Condorí, M. (2022). Acceso a la energía en barrios populares en Argentina: Una aproximación para caracterizar la PE en el espacio urbano. *ERMA*, 50, 29–35.
- García Ochoa, R. (2014). Pobreza energética en América Latina. Santiago, CEPAL.
- González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renew. & Sust. Energy Rev.*, 47, 377-385.
- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., y Torrasi, G. (2018). On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness. *Social Indicat. Res.*, 1-34.
- Guzowski, C., Ibañez Martín, M. M., y Zabaloy, M. F. (2021). Pobreza Energética: Conceptualización y su Vínculo con la Exclusión. *Revisión para América Latina. Ambiente & Sociedade*, 24.
- Kozulj, R. (2015). El sector energético argentino. Un análisis integrado de sus problemas, impactos y desafíos macroeconómicos. EDITORIAL UNRN.
- Nardo, M., & Saisana, M. (2009). OECD/JRC Handbook on constructing composite indicators. Putting theory into practice.
- Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Measuring energy poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 231–243.
- Omer, A. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable energy reviews*, 12(9).
- Pachauri, S., y Spreng, D. (2011). Measuring and monitoring energy poverty. *Energy Policy*, 39(12).
- Recalde, M. (2011). Energy policy and energy market performance: Argentinean case. *Energy Pol.*, 39.
- ReNaBaP (2022), Manual para conformación y actualización del ReNaBaP. Bs.As.
- Rodríguez, C. (2016). Aspectos bioéticos relacionados con la política energética de América Latina. *Revista Colombiana de Bioética*, 11(1), 68–91.
- Siksnyte-Butkiene, I., Streimikiene, D., Lekavicius, V., y Balezentis, T. (2021). Energy poverty indicators: A systematic literature rev and comprehensive analysis of integrity. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102756.
- Schirmer Soares, R., Weiss, M., Lampis, A., Bermann, C. y Hallack, M. (2023). La pobreza energética en los hogares y su relación con otras vulnerabilidades en américa latina. BID.
- Urquiza, A.; Amigo, C.; Billi, M.; Calvo, R.; Labraña, J.; Oyarzún, T. y Valencia, F. (2019). Quality as a hidden dimension of energy poverty in middle-development countries. *Energy and Buildings*, 204.
- Winkler, H. (2021). Towards a theory of just transition: A neo-Gramscian understanding of how to shift development pathways to zero poverty and zero carbon. *Energy & Social Science* 70:101789

**MULTIDIMENSIONAL ENERGY POVERTY INDEX
FOR MARGINALIZED URBAN HOUSEHOLDS:
AN APPROACH FROM SAFE ACCESS, HOUSING QUALITY, AND ENERGY EQUITY**

ABSTRACT: This study focuses on the investigation of energy poverty in households with characteristics similar to those in marginalized neighborhoods in Argentina. A multidimensional composite index was developed and evaluated, taking into account aspects such as access to electrical energy, security in energy access and final use, housing construction quality, and equity in energy expenses. The primary data sources utilized were the National Register of Marginalized Neighborhoods (2017/2023) and the National Household Expenditure Survey (2017/2018). The latter was employed to identify households similar to those in Marginalized Neighborhoods through a substitution variable. The formulated indicator allows for the quantification of energy poverty in terms of intensity at both the national and regional levels. A prevalence of medium-intensity energy poverty is observed in households resembling Marginalized Neighborhoods across the entire country. However, the northern regions displayed a higher intensity of energy poverty. Meanwhile, the Cuyo region is simultaneously the region with the highest percentage of households without access to electricity and the second highest proportion of households without energy poverty according to the created index. Lastly, the study underscores the necessity for region-specific policies based on regional and territorial peculiarities to address effectively energy poverty in Argentina.

Keywords: energy poverty, marginalized urban areas, multidimensional index

INSTRUMENTOS Y DESAFÍOS DE LA POLÍTICA PÚBLICA ENERGÉTICA EN LA PROVINCIA DE LA PAMPA

Georgina Doroni¹, Florencia Anabel Rivara¹

¹secretaría de Energía y Minería del Gobierno de La Pampa

Tel. 02954-456818 - e-mail: frivara@lapampa.gob.ar

RESUMEN: El presente documento tiene por finalidad exponer los lineamientos, metas y acciones del Plan Estratégico de Energía que está llevando adelante la Provincia de La Pampa, desde la aprobación del Régimen de Desarrollo Energético sancionado por Ley Provincial N° 3285 en el año 2020. Asimismo, se pretende el desarrollo de los objetivos de transición de la política pública energética de la Provincia que - acompañados con los compromisos de descarbonización de la matriz energética nacionales e internacionales -, se centran en promover la generación energía eléctrica a partir de fuentes limpias y renovables bajo un esquema de inversiones públicas y privadas que permita atender la demanda de abastecimiento, desde una mirada descentralizada y eficiente del sistema en su conjunto.

Palabras claves: plan estratégico, transición energética, energías renovables, eficiencia.

INTRODUCCIÓN

Ejes y objetivos de la transición energética en La Pampa

A partir de la sanción del Régimen de Desarrollo Energético (Ley N° 3285) la Provincia de La Pampa dispone de instrumentos legales, económicos, financieros y de promoción que permiten materializar la política pública energética pampeana, a partir de los lineamientos esbozados en el Plan Estratégico de Energía de la Provincia, que han sido receptados en el marco normativo local integrado por Ley N° 3285 y sus normas reglamentarias y complementarias.

El Plan Estratégico de Energía se inscribe en un paradigma de descarbonización, digitalización y descentralización del abastecimiento eléctrico y tiene sustento en la idea de que el acceso a un suministro de energía fiable y asequible constituye un derecho humano, que permite a los pueblos materializar en la práctica otras prerrogativas fundamentales y avanzar en sus condiciones de desarrollo y calidad de vida.

Esta planificación de largo plazo impulsada por el Gobierno de La Pampa, ha sido edificada sobre cuatro ejes (de oferta, demanda, institucional y social) que guían las metas y acciones proyectadas en materia de energía. El eje de la oferta está vinculado a desarrollar proyectos y mecanismos para la provisión de productos y servicios energéticos que brinden nuevas posibilidades de abastecimiento y contemplen el aprovechamiento de los recursos locales, con integración de valor en la provincia; mientras que el eje de la demanda propone alcanzar consumos de energía sostenibles, impulsados por la conciencia del uso racional y eficiente de la energía, la optimización de los procesos productivos y el recambio tecnológico. Por su parte, el eje social del Plan impulsa servicios energéticos confiables, seguros y de calidad para las familias, comercios e industrias pampeanas acompañados con esquemas tarifarios justos y razonables; a la par que el eje institucional se centra en la vinculación de actores estratégicos, cuyo trabajo articulado, colaborativo y conjunto posibilite la consecución de las metas promovidas.

En ese marco, las líneas de acción desarrolladas por el Gobierno pampeano, a través de la Secretaría de Energía y Minería, para materializar los objetivos del Plan Estratégico de Energía, están específicamente orientadas a reconvertir y diversificar la matriz energética - iniciando la transición hacia una Provincia productora de energía -, gestionar la demanda, mediante la promoción del ahorro y la eficiencia energética, la información y empoderamiento de las personas usuarias, como así también modernizar y

digitalizar el Sistema Eléctrico Provincial (S.E.P); a la par de transformar y fortalecer a la firma local Pampetrol S.A.P.E.M. como empresa de energía, con el desafío de captar inversiones públicas y privadas para la generación de energía a partir de los recursos provinciales.

Los objetivos promovidos por el Estado Provincial coinciden con las metas delineadas en el Plan Nacional de Transición Energética al 2030 y los Lineamientos y Escenarios para la Transición Energética al 2050, recientemente publicados por la Secretaría de Energía de la Nación mediante Resoluciones N° 517/2023 y 518/2023, respectivamente. Esos instrumentos marcan el rumbo en el diseño, planificación y ejecución de una transición energética justa y sostenible en Argentina, en el afán de promover una política de aplicación sectorial que contemple “(...) la explotación racional de los recursos naturales y la preservación del ambiente.”

En el mismo sentido, la política de transición responde además al Plan Nacional de Adaptación y Mitigación del Cambio Climático a través del cual se proyectan, miden y evalúan los avances en el cumplimiento de los compromisos asumidos por el Estado Nacional en el Acuerdo de París de 2015 y en las NDC presentadas, en relación a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Del mismo modo, existe una correlación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 trazada por la Asamblea General de las Naciones Unidas entre los cuales el número 7 promueve una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todas las personas; a la par que se corresponde con los criterios de la Resolución N° 65/151 de la O.N.U. que reafirma el apoyo a la aplicación de políticas y estrategias nacionales que combinen un uso más expandido de fuentes de energía renovables y de tecnologías de bajas emisiones, con una utilización más eficiente de la energía y un mayor acceso a servicios energéticos modernos, fiables, asequibles y sostenibles.

Enmarcada en esos instrumentos, la política pública que se lleva adelante desde la Secretaría de Energía y Minería de La Pampa está signada por la equidad y procura garantizar iguales tecnologías, oportunidades, servicios y calidad de vida en toda la Provincia, con una perspectiva social y territorial descentralizada. Para ello se diseñan y planifican inversiones y proyectos que promueven un servicio eléctrico estable y seguro, comprometido con la eficiencia y con el objetivo de que La Pampa, alcance la autarquía energética en términos de balance, en un plazo de 20 años.

El desarrollo de este trabajo se efectuará teniendo en consideración los ejes de la oferta y la demanda, y los proyectos y acciones que se han planificado desde la Secretaría de Energía y Minería, a corto, mediano y largo plazo, para vincular de manera eficiente, moderna, descentralizada y transparente, esos dos segmentos.

Modelo de implementación y actores

Explicitadas las bases de la política energética pampeana, es importante conocer cómo se implementan y ejecutan los objetivos y lineamientos del Plan, a través del diseño de un modelo descentralizado, equitativo, inclusivo y sostenible.

Considerando el diagnóstico realizado sobre el Sistema Eléctrico Provincial (S.E.P.) y sobre la demanda de energía eléctrica actual y proyectada para La Pampa, a través del Plan Estratégico se propulsa la búsqueda de soluciones de abastecimiento que procuran atender puntos estratégicos del sistema a partir de proyectos de pequeña y mediana escala, ajustados a las necesidades detectadas en diferentes lugares del territorio, de manera tal que los efectos y beneficios de la transición se materialicen con una mirada equitativa, sobre la premisa de que el acceso y disfrute de los servicios energéticos configuran un derecho humano¹.

La esencia de este modelo que caracteriza a la energía como bien imprescindible para el desarrollo, se fortalece al contar con dos actores estratégicos. Por un lado, la empresa local de energía Pampetrol S.A.P.E.M., quien garantiza la presencia del Estado en la gestión y conservación de los recursos energéticos estratégicos y en la implementación de modelos de negocio y alianzas público-privadas que benefician a la ciudadanía pampeana y posibiliten un real y progresivo crecimiento productivo y social de la provincia; y por otro, la Administración Provincial de Energía como distribuidora provincial de

¹ Se apoya en una visión del planeamiento energético basada en los DDHH, considerando el acceso a la energía como un derecho universal necesario para el desarrollo humano y la generación de un proceso igualador de oportunidades (DURÁN-CONDORÍ: 2015).

energía eléctrica que opera y diagnostica las necesidades del Sistema Eléctrico Local, a la par que abastece a los usuarios y usuarias de la zona no concesionada del territorio provincial².

La sinergia y trabajo articulado entre estas dos empresas públicas reafirman las bases para avanzar hacia un modelo de autarquía energética, que permita transitar desde una provincia netamente consumidora de energía, cautiva de los precios del Mercado Eléctrico Mayorista, a una provincia que genera energía a partir de sus recursos locales para abastecer progresivamente su demanda de abastecimiento a precios asequibles y competitivos.

Sin perjuicio de lo expresado, la búsqueda del Plan apunta a posicionar a La Pampa en el escenario energético, y a generar nuevos nichos de mercado y de negocios, que posibiliten la asociación pública-privada en puntos de generación definidos como estratégicos en la plataforma de desarrollo local, con un marco normativo que brinde seguridad y previsibilidad jurídica, económica y financiera para la inversión.

Esquemas de inversión para la generación de energía

La decisión del Gobierno Provincial de implementar y ejecutar un Plan Estratégico de Energía, que determina los objetivos y lineamientos de la política energética, parte de la necesidad de alcanzar una Provincia con autarquía energética en términos de balance que, como se anticipó, concuerda con las metas fijadas por el Estado Nacional hacia la transición energética desde una perspectiva inclusiva, dinámica, estable, federal, soberana y sustentable.

En ese sentido, desde la Secretaría de Energía y Minería, se promueve la ejecución de proyectos que permitan optimizar los resultados y la sinergia de los distintos actores involucrados, en pos de un desarrollo provincial caracterizado por la descentralización en la ubicación de los proyectos y el aprovechamiento de la disponibilidad y potencialidad de los recursos, posicionando a La Pampa como punto para la radicación de inversiones para el desarrollo productivo y expansión de nuevos negocios.

Asimismo, el balance de la gestión y avance de la política energética durante el período 2020-2022 ha ratificado que el rumbo delineado en el Plan Estratégico de Energía, orientado a producir la energía que se consume en la provincia, que se visualiza cada vez más estratégico y competitivo, sobre todo en el contexto del último año, que estuvo signado por aumentos de los precios estacionales de energía, potencia y transporte, como así también por un proceso de segmentación tarifaria que redujo en unos casos y eliminó en otros, el subsidio del Estado Nacional al costo de compra de la energía eléctrica.

Sin perjuicio del contexto favorable expresado, se requiere un esquema de inversión en activos e infraestructura (plan de obras) que acondicionen el sistema para recibir la inyección de energía e incorporen la tecnología necesaria para modernizar y digitalizar el SEP.

Esas metas requieren de estrategias de inversión, por eso el Régimen de Desarrollo Energético apuesta por esquemas asociativos públicos-privados, que potencien la unión entre los sectores en pos de un objetivo común: una Provincia que genere su propia energía.

En el desarrollo de esas estrategias de captación de inversiones, el Estado Provincial pampeano mantiene su impronta de considerar al sector público como agente promotor y ejemplificador del cambio, capaz de planificar e impulsar un nuevo rumbo para materializar las políticas públicas que mejoran la calidad de vida de pampeanos y pampeanas. En ese sentido, resulta primordial asumir el desafío de destinar fondos para la puesta en marcha de plantas de generación e iniciativas que promuevan una Provincia más eficiente y soberana en términos energéticos, y que alienten al sector privado a invertir su capital La Pampa.

De allí que, con la finalidad de transformar a La Pampa en una provincia productora de energía eléctrica, Pampetrol S.A.P.E.M. desarrolla estrategias y modelos de asociación para captar socios dispuestos a invertir en el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de recursos locales. El Régimen de Desarrollo Energético brinda el escenario propicio para la concreción de distintos esquemas asociativos, previendo para aquellos proyectos de iniciativa privada asociados a la empresa de energía local la posibilidad de concretar contratos de abastecimiento, extensión de los beneficios fiscales, plazos y precios que garantizan el repago del proyecto y prioridad en el despacho de energía.

² De esta manera, se da cuerpo a la importancia de una nueva modalidad de empresa pública en la ejecución de la faceta empresarial del Estado en sectores estratégicos a partir de asumir como condiciones sine qua non de toda gestión económica a: 1) la procura de la eficiencia y la responsabilidad, y 2) la concreción directa e inmediata del bien común (CARABAJALES: 2021:155).

Otro dato relevante para destacar es que el Régimen de Desarrollo Energético creó el Fondo Específico para la Transición Energética (F.E.T.E) – artículo 53-, el cual tiene destino específico de aplicación la incorporación de mejoras y tecnologías que permitan avanzar en la transición energética a la par que permite fomentar el desarrollo de los distintos Programas implementados en la Ley N° 3285 y financiar proyectos de generación a partir de fuentes renovables. Dicho Fondo además materializa uno de los lineamientos más importantes de la transición pampeana, de apalancar a través de la renta hidrocarburífera percibida por la provincia proyectos de generación renovable. En ese sentido, uno de los recursos con los que se financia se integra con el 5% neto del impuesto al valor agregado (I.V.A.) de los ingresos que por materia hidrocarburífera perciba la Provincia.

DIAGNÓSTICO DE BASE COMO ESTRATEGIA DE PLANIFICACIÓN

En el entendimiento que el diseño de las políticas públicas requiere de líneas de base que permitan esquematizar metas a corto, mediano y largo que garanticen la rentabilidad económica, social y ambiental en los proyectos que encare la Provincia, se realizó desde Pampetrol la contratación de un estudio para conocer el comportamiento de la demanda energética.

Los resultados arrojaron como dato preliminar que la Provincia de La Pampa presenta una demanda energética muy dispersa en horas y días.

En tal sentido, la curva monótona presente en la figura 1 muestra las horas de demanda máxima de potencia de la Provincia en el año, y pone en evidencia *“cuál es el tamaño de estructura de red necesaria para garantizar la “potencia firme requerida” en la provincia, pero que durante prácticamente todo el tiempo nunca es operada en ese nivel”*.

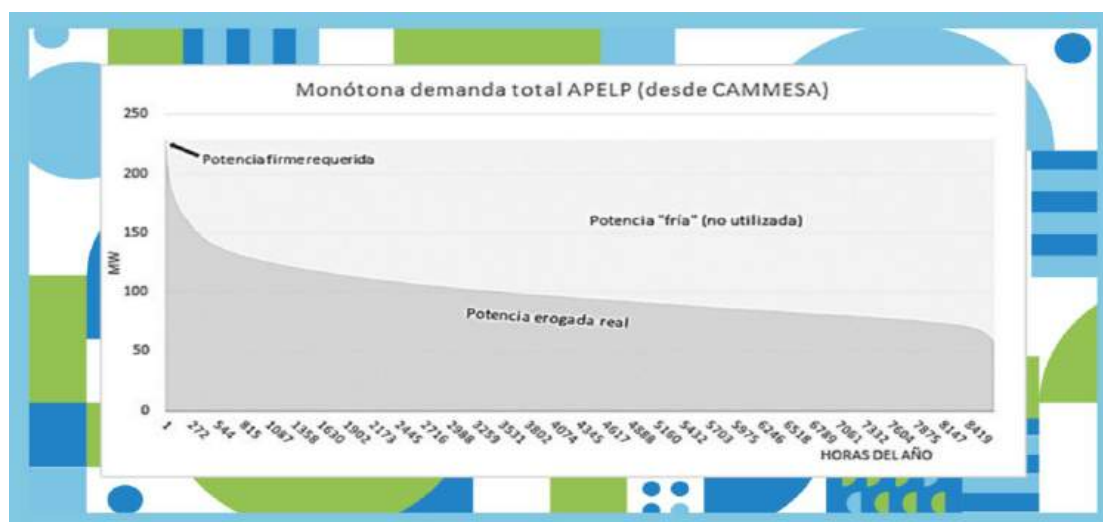


Figura 1

De este análisis, se evidencia la relevancia de procurar soluciones que prevengan el exceso de reserva de potencia fría, la cual, aun existiendo, no llega a suministrarse con calidad dado los inconvenientes de distribución y tensión. Por tanto, si bien una posible alternativa sería la inversión en ingentes obras de infraestructura, como se evidencia en la monótona precedente, la alta demanda se registra durante pocas horas en el año, con lo cual es preferible optar por una solución que ataque puntualmente esa situación, de manera de no invertir en infraestructura que resultaría ociosa la mayor parte del tiempo.

En ese sentido, la estrategia de incorporar generación de energía local permite desplazar en el tiempo las inversiones para ampliar la infraestructura del Sistema Eléctrico Provincial (S.E.P.), y representa una solución superadora en términos costo/beneficios a esquemas basados en expansión de infraestructura de AT/MT (alta tensión/media tensión).

De esta manera, se apunta a acompañar el crecimiento esperado de la demanda, remediar restricciones contingentes y garantizar el suministro eléctrico, incorporando potencia y energía propias en uno o más puntos de interconexión desde los cuales se aporte a la cobertura de los picos de consumo asociados a problemas que impactan en la cantidad de energía disponible, tensión y calidad del servicio en general. Asimismo, el plan provincial de generar energía eléctrica en La Pampa, que aborde gradualmente las limitaciones mencionadas, supone iniciar la cobertura de los picos agudos de demanda en formato

generación “forzada óptima”, es decir, aquella generación que es más costosa que la generación centralizada de mínimo costo de producción, pero menos costosa que ésta luego de aplicados los costos de ampliación de la red de transporte en AT para atender al consumo. Esta estrategia se complementa con las medidas de eficiencia energética, de esa manera no solo se atienden los picos de demanda, sino que se contribuye a reducir y gestionar los mismos.

La generación implicaría ventajas frente a la compra de energía en el Mercado Eléctrico Mayorista (M.E.M.), y justificarían un rol extendido a cargas intermedias o de base cuando el Sistema Argentino de Interconexión no esté disponible, aprovechando las prestaciones de la bidireccionalidad.

Desde la Administración Provincial de Energía - en su rol de agente del M.E.M.- se realiza la compra de energía a CAMMESA para satisfacer la demanda energética provincial compuesta de un universo de 175.855 usuarias y usuarios del sistema eléctrico, habiendo invertido la Provincia la suma de \$ 5.602.459.738,45 para el periodo comprendido de enero a diciembre de 2022, lo que equivale a un promedio mensual de \$ 466.871,87. Dicho importe se destinó a la compra de energía, equivalente a 905.784,20 MWh para el año 2022, destinados el 43,41% para atender la demanda residencial de la Provincia, el 0,06% para abastecer las necesidades energéticas de la categoría electrodependientes, el 43,50% se destinó a la demanda no residencial con consumos menores a los 300 kWh mientras que la demanda no residencial con consumos mayores a 300 kWh representó el 12,69% de la demanda energética pampeana. Por último, el 0,35% tiene destino a al área de salud.

El consumo representado por la categoría de grandes usuarios con consumos mayores a 300 kWh es la energía de mayor costo en el M.E.M.- y significó en el año 2021 un costo de aproximadamente \$732.000.00 (105.224,7 MW/h) mientras que para el año 2022 representó una erogación de \$ 1.378.800.992 (113.655 kWh).

Por ello, sustituir paulatinamente esa demanda de grandes usuarios con proyectos de generación local con criterio de descentralización, garantiza a la Provincia iniciar el camino hacia la transición energética e iniciar la planificación del Mercado Local de Energía Eléctrica (M.L.E.E) brindando un marco propicio para producir energía a precios que resulten más competitivos, favorecer el desarrollo productivo de La Pampa y volcar recursos a la economía local.

A través de los proyectos locales de generación de energía se procura alcanzar el abastecimiento del 20% de la demanda anual provincial de Grandes Usuarios de la Distribuidora (G.U.D.I.s), con demandas mayores a 300 kW, porcentaje que permite reemplazar la energía que representa el mayor costo de compra para la Provincia, permitiendo dicho porcentual adsorber “Compras Conjuntas” conforme la Resolución MINEM N° 281/2017.

EJE OFERTA: PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Mediante Ley N° 3.285 se declara de interés estratégico la generación de energía eléctrica en la Provincia que priorice el aprovechamiento de fuentes renovables. En dicho sentido y de conformidad al diagnóstico anteriormente descripto y la característica de la demanda energética de La Pampa, se prevé inicialmente la materialización de proyectos de generación a través del uso de tecnología solar fotovoltaica por resultar la alternativa más adecuada para atender los problemas de abastecimiento de demanda de energía eléctrica del subsistema norte pampeano, y además reflejar una ventaja comparativa en costos y beneficios respecto a la expansión de redes de transporte en alta y media tensión.

En ese marco, Pampetrol SAPEM en su rol de empresa de energía y brazo ejecutor de la política pública energética pampeana realizó el llamado a presentar iniciativas privadas para la instalación de parques de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. De las ofertas que se recibieran se daría prioridad a aquellos proyectos a desarrollarse en los puntos estratégicos del territorio provincial ubicados en el subsistema norte de La Pampa e identificados como sitios críticos por la Administración Provincial de Energía: Caleufú, Intendente Alvear y Victorica, para poder así atender los problemas de abastecimiento y tensión a la par que posibilitaría diversificar la matriz energética local, en consonancia con el compromiso de avanzar hacia una provincia productora de energía. Luego del llamado a iniciativa se realizó desde Pampetrol SAPEM una ronda digital de negocios, a partir de la cual se recibieron numerosas consultas sobre las alternativas de negocio.

En ese sentido, los oferentes podrían desarrollar los proyectos por sí o en asociación con Pampetrol SAPEM. En la modalidad asociativa, la firma pampeana podía aportar un contrato de provisión de largo plazo (LTPPA) con la Administración Provincial de Energía, hasta cubrir la totalidad de la energía contratada, equivalente a 21.000 MWh/año. Asimismo, se ofrecía la alternativa de que Pampetrol

aportase capital, para lo cual los oferentes debían proponer el valor presente de la inversión requerida y el cronograma de desembolsos. Respecto a la comercialización de la energía, la convocatoria preveía también distintas alternativas: que la energía generada sea comercializada con Pampetrol SAPEM, o en el MEM a través de contrataciones en el MATER y/o en calidad de Autogenerador Distribuido.

El esquema planteado fue innovador y permitió conocer y ponderar cualitativa y cuantitativamente los modelos de negocios que se presentaron. Esa base de datos y conocimiento permitió fijar las condiciones técnicas, económicas y jurídicas que resultaren más competitivas para La Pampa para el posterior llamado de Licitación Pública N° 2/22 (llevada adelante por Pampetrol SAPEM) para la provisión del equipamiento y construcción del Primer Parque Solar Fotovoltaico a instalarse en la localidad de Victorica.

De esta manera, la sinergia entre Pampetrol S.A.P.E.M. y por la Administración Provincial de Energía, permitió capitalizarse en el diseño de un proyecto de generación de energía a partir de fuentes renovables ajustado a las necesidades de la zona, con el objetivo de resolver problemas de abastecimiento en épocas estivales, mejorar la calidad del servicio y aumentar la oferta energética disponible para el consumo residencial e industrial, sobre la base de la planificación determinada por la Secretaría de Energía y Minería. La selección del punto de generación a instalarse en la localidad de Victoria responde a un estudio y conocimiento previo de las necesidades y puntos críticos del S.E.P., como así también de la disponibilidad de la infraestructura necesaria para la inyección de energía al sistema, que permite planificar y diseñar proyectos de generación que resulten factibles técnica y económicamente para la Provincia, en función de alcanzar generación de pequeña y mediana escala en distintos puntos del territorio pampeano (descentralización) que representen una mejora cualitativa en la provisión y abastecimiento del servicio público de energía eléctrica.

La obra del Parque Solar Fotovoltaico Victorica se adjudicó por un monto que asciende a USD 8.168.620 y la empresa adjudicataria es responsable de la provisión de equipos y materiales, la construcción, montaje y puesta en marcha del parque de 7.4 MWA de potencia nominal, bajo la modalidad llave en mano, más la operación y mantenimiento por el plazo de 12 meses de garantía por productividad.

El parque de Victorica representa un hecho de trascendencia en el avance de los objetivos del Plan Estratégico de Energía y reafirma el camino, dirección y compromiso asumido por el Gobierno Provincial hacia la transición energética. La energía generada será adquirida por la Administración Provincial de Energía en el marco del Contrato de Abastecimiento celebrado entre las partes. Con el remanente de dicho Contrato y en función de la generación que aporte esta primera planta de generación se analizará según las necesidades del S.E.P. la instalación de otros parques en las puntas de línea del sistema.

Modelo de Negocio

El modelo de negocio proyecta que la energía que genere el parque solar-fotovoltaico de Victorica permita poner en funcionamiento el Mercado Local de Energía Eléctrica, validando los objetivos de la política pública energética y garantizando precios competitivos y asequibles de la energía a los pampeanos y pampeanas.

El artículo 75 de la Ley N° 3.285 establece que la Administración Provincial de Energía – A.P.E - podrá adquirir *“la energía eléctrica producida por los proyectos de generación que se realicen dentro de la provincia de La Pampa, a través de Pampetrol SAPEM o grupos empresarios integrados por dicha sociedad”*. A tales fines el artículo 76 prevé la fijación de condiciones contractuales y procedimientos para la celebración de los contratos entre Pampetrol SAPEM, la A.P.E y/o demás organismos y empresas.

Asimismo, el artículo 44 del Anexo I del Decreto Reglamentario N° 1362/21 establece que la Secretaría de Energía y Minería está facultada para *“establecer las condiciones técnicas y económicas que deberán respetar los instrumentos contractuales que se suscriban en el marco del artículo 75”* citado precedentemente, a la par que estipula que la energía generada será comercializada exclusivamente con la Administración Provincial de Energía o con la persona humana o jurídica, pública o privada, que esta última autorice.

Por ello, se instruyó desde esta Secretaría por Resolución N° 62/2021 a la Administración Provincial de Energía a contratar con Pampetrol S.A.P.E.M, por el plazo de 20 años, el abastecimiento de energía eléctrica hasta un máximo del 20% de la demanda provincial anual de los grandes usuarios de la distribuidora (G.U.D.I.s) con consumos iguales o mayores a 300 kW a un valor que no exceda el Precio Estabilizado de Energía establecido para el M.E.M. para esa categoría de demanda, conforme

programación trimestral vigente.

El esquema de contratación de abastecimiento de energía eléctrica planteado se materializó a través de la celebración de un “Contrato Marco” entre la APE, en su rol de compradora y Pampetrol SAPEM en calidad de vendedora, cuya instrumentación brinda condiciones de competitividad y previsibilidad jurídica y económica. Las obligaciones y derechos emergentes de esa contratación son intransferibles. La energía generada será comercializada exclusivamente con la Administración Provincial de Energía, salvo expresa autorización de ésta última de poder liberar energía para ser transaccionada a través del mecanismo establecido en la Resolución del ex Ministerio de Energía y Minería de la Nación N° 281/2017 (MATER).

Por medio del contrato se fija el valor de compra por unidad de energía eléctrica, que no supere el precio máximo establecido por la Secretaría de Energía y Minería, y al momento del pago - de acuerdo a la tasa de cambio publicada por el Banco Central de la República Argentina “Tipo de cambio de referencia Comunicación A 3500 (Mayoristas)” - no exceda el precio establecido en el MEM para el segmento de grandes usuarios de la distribuidora (G.U.D.I.s) mayores a 300 kW. De esta manera se garantiza un precio tope en moneda nacional y que la Administración Provincial Energía no adquiera la energía generada por proyectos locales a un precio mayor que los fijados por el M.E.M.

EJE DEMANDA

El Plan Estratégico de Energía tiene entre sus principales objetivos el de promover una demanda inteligente, a través del ahorro y el uso eficiente de la energía en todos los sectores de la sociedad, que tienda a evitar usos desmedidos de energía y obtener iguales o mayores resultados con un menor consumo, con miras a promover la sustentabilidad ambiental y empoderamiento de las personas usuarias.

La Ley N° 3.285 prevé entre sus objetivos *“fomentar el uso racional y eficiente de la energía”*, impulsando acciones de eficiencia tanto en el ámbito público como privado – de conformidad al artículo 3° incisos 2 y 4-

Asimismo, el régimen normativo estatuye como Autoridad de Aplicación a la Secretaría de Energía y Minería, y dentro de sus competencias específicas se encuentra la de elaborar y proponer políticas y planes de acción que propicien mejoras en la eficiencia energética y su difusión, y estimar las necesidades presupuestarias para ejecutar las medidas.

A los fines de instrumentar la política energética se han delineado Programas con objetivos específicos, entre los cuales se encuentran los Programas de “Promoción de Eficiencia Energética” y “Eficiencia Energética en inmuebles pertenecientes al Estado Provincial”, previstos en el Capítulo IV de la Ley N° 3285 y reglamentados por medio del Anexo I del Decreto N° 1362/2021 (en sus artículos 20, 21, 25 y 26).

El primero de los Programas tiene la finalidad de ***“lograr consumos sustentables en toda la cadena de abastecimiento energético (...)”*** a la par que la segunda procura *“fomentar el uso eficiente de la energía a través de la gestión y uso racional de los recursos a disposición, promoción de mejoras edilicias, reemplazos tecnológicos y otras acciones que propendan al ahorro de energía”*. A su vez, se facultó a la Secretaría de Energía y Minería para establecer *“los criterios de selección de aquellos proyectos que tengan por fin mejorar la eficiencia energética y mecanismos de promoción de mejoras tecnológicas en los procesos, las condiciones técnicas, económicas (...)”* y estimar las necesidades presupuestarias para ejecutar estas medidas.

En el marco de estos programas se han delineado desde esta Secretaría las siguientes acciones:

Plan de Alumbrado Público Eficiente e Inteligente

A través del Decreto N° 4849/2021 se creó el Plan de “Alumbrado Público Eficiente e Inteligente” con el objeto de propender al recambio paulatino de la totalidad de las luminarias del alumbrado público en la Provincia por lámparas con tecnología LED, asumiendo el desafío de ser una Provincia más eficiente, promoviendo una mejora en la calidad de vida de los pampeanos y pampeanas, lo que a su vez permite resignificar y revalorar los espacios de acceso comunitario.

Asimismo, el Plan implica la incorporación gradual de nuevas tecnologías, reducción de las emisiones de gases efecto invernadero y el desarrollo de proyectos que mejoren la eficiencia del alumbrado público.

El referido Plan implementa un sistema colaborativo para el recambio de luminarias en el alumbrado público de Municipios y Comisiones de Fomento de la Provincia por tecnologías más eficientes, que garanticen una mejora en el ahorro y uso eficiente de la energía.

Previo a la creación de este Plan desde la Subsecretaría de Energías Renovables se realizó un diagnóstico del alumbrado público en toda la Provincia, que involucró a todas las localidades y permitió conocer y jerarquizar las necesidades de cada una de ellas para mejorar la eficiencia en el servicio de alumbrado público de competencia y titularidad de las Municipalidades y Comisiones de Fomento.

Tales necesidades representan una problemática que afecta a todas las localidades de la Provincia, quienes detentan la titularidad del servicio de alumbrado público (conforme Ley N° 1597) por lo que se requiere la intervención y acompañamiento del Estado Provincial, en un rol que dirija la política pública, fije objetivos comunes y realice una inversión inicial. De esta manera, se procura brindar respuesta a las solicitudes recibidas por distintas localidades de la Provincia que no pueden por sus propios medios invertir en su sistema para el provisionamiento de luminarias LED.

Los resultados de los relevamientos del sistema de alumbrado público pampeano arrojaron que dicho sistema se compone de 71.083 luminarias. De esa manera se logró alcanzar una línea de base con los datos del total de las luminarias del tipo (mercurio, sodio o led), ubicación, cantidad de luminarias por cuadra, cobertura por localidad, arrojando como resultado que se requerían 56.892 lámparas, lo que representa el 82% del servicio de alumbrado público pampeano.

Con base en ese relevamiento se delineó el objeto de este Plan y se estableció la necesidad de promover compras centralizadas de luminarias bajo criterios que permitan unificar las tecnologías aplicadas y disminuir los costos de adquisición, hasta alcanzar el recambio total de las tecnologías ineficientes, las que serán distribuidas de conformidad a criterios de equidad y transparencia entre las distintas localidades de la Provincia, garantizando un servicio en condiciones de igualdad para los y las habitantes pampeanos.

En el mencionado Decreto de creación del Plan se indicó expresamente que para iniciar el recambio progresivo de luminarias desde el Gobierno Provincial se realizaría una inversión inicial de \$400.000.000. Al Plan mencionado adhirieron las 80 las Municipalidades y Comisiones de Fomento pampeanas, con las cuales se firmó individualmente un Convenio de Adhesión, para la entrega de luminarias con tecnología LED o el otorgamiento de un subsidio para la ampliación o mejora del alumbrado público, en el caso de aquellas localidades que ya tenían el 100% de su sistema con tecnología LED.

Hasta el momento el número de luminarias entregadas asciende a 16.610 y son 43 las localidades que alcanzaron el 100% de tecnología LED en su alumbrado en el marco de este Plan.

Además, para las 8 localidades que habían logrado el recambio total con anterioridad al Plan, se tramitaron subsidios con destino a la ampliación, readecuación y/o mejora del alumbrado público local, por un monto total de \$ 31.027.227,12.

Un dato importante a destacar es que todas las localidades pampeanas han recibido luminarias con tecnología LED, lo que denota el alcance territorial de esta política pública y con esta primera etapa de implementación se logró que el sistema de alumbrado público pampeano cuente con 37.611 luminarias LED, lo que implica que el 53% del sistema disponga de tecnología más eficiente.

Esta política pública ha sido diseñada con vocación de continuidad, sobre la base de ser un Plan colaborativo y solidario, que aúna los esfuerzos de cada localidad para alcanzar el recambio total del alumbrado público por tecnología LED. En ese sentido, cada localidad adherida a medida que fue recibiendo las luminarias se comprometió al reintegro de un aporte mensual al Fondo Específico para la Transición Energética, equivalente al 50% del ahorro económico generado como consecuencia del recambio por tecnología más eficiente. Dicho aporte será reinvertido en la compra de nuevas luminarias para alcanzar la meta provincial de que el sistema de alumbrado público sea 100% LED.

Con las luminarias entregadas hasta el momento - y de conformidad a la tarifa de la categoría alumbrado público en el cuadro tarifario vigente- el aporte del reintegro mensual equivale a \$ 4.121.956, lo que permite la compra de 81 luminarias para iluminar 27 calles más por mes, de las localidades pampeanas. A su vez, este Plan representa una reducción anual de 946 toneladas de emisiones de dióxido de carbono, que equivale a lo absorbido por 67.330 árboles y un ahorro energético de 141.884 kWh/mes.

Asimismo, a los fines de lograr una política pública transparente se implementó un panel de control, al cual se accede desde el sitio web de la Secretaría, a través del cual se puede visualizar y realizar el seguimiento del avance del Plan y el cupo asignado de luminarias de cada localidad.

Programa de Redes Eficientes

Por medio del artículo 49 de la Ley N° 3285 se crea el “Programa de Redes Eficientes” con el objetivo de *“arbitrar los medios para realizar los recambios tecnológicos que permitan la optimización de la gestión de las instalaciones puestas a disposición de la demanda”*.

En el marco de este Programa se tramitó por Licitación Pública N° 43/21 la adquisición de un software para la medición comercial a las concesionarias del servicio público de distribución de energía eléctrica, que permitiera gestionar de manera más eficiente las redes, y realizar telemedición y control de la potencia y energía entregada - por banda horaria- a cada concesión. Asimismo, se tramitó la Licitación Pública N° 50/21 para la adquisición de 60 medidores inteligentes, para registrar la entrega a las concesiones. Entre las dos licitaciones antes mencionadas se alcanza un monto adjudicado de \$6.402.972,50.

Asimismo, entre los lineamientos estratégicos de la política energética provincial se encuentra que *“el usuario y consumidor será el centro y destinatario de las políticas sectoriales, de los servicios y productos energéticos y tendrá derecho a generar su propia energía (autogeneración), a volcar los excedentes a las redes para obtener un resultado económico, a la transparencia, a conocer cómo y cuánto consume y cómo mejorar la eficiencia de sus consumos (tanto en cantidad como en precio)”* – artículo 4° inciso 12 de la Ley N.º 3285-.

Por ello, La Pampa está invirtiendo en la adquisición de 20.000 medidores con destino a la demanda provincial, por una suma aproximada de USD 3.600.000. Esos medidores permitirán cubrir aproximadamente el 10% del universo de personas usuarias del sistema eléctrico provincial. Esta inversión tiene por objeto atender la gestión eficiente de la demanda, aportando mejoras en la tecnologización y modernización del sistema.

La incorporación de estos medidores posibilitará conocer cómo se comporta la demanda, y a partir de ello diseñar y planificar estrategias para promover un uso más racional y eficiente de la energía y adoptar las mejoras soluciones que beneficien al sistema en su conjunto.

Esta medida tendrá un impacto positivo sobre los usuarios y usuarias pampeanas, quienes podrán acceder a datos reales y certeros sobre sus consumos eléctricos, que le permitan empoderarse y tomar decisiones conscientes en pos de un uso responsable y equitativo de la energía.

Para la implementación de esta política pública se trabajará de manera conjunta con nuestras entidades cooperativas, reforzando la alianza estratégica que tiene La Pampa con el sector cooperativo para avanzar en los objetivos y compromisos asumidos en torno a la eficiencia energética.

Régimen Provincial de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Eléctrica

La Generación Distribuida ha sido declarada de interés estratégico por la Ley N° 3.285, adhiriendo la Provincia en el artículo 27, de manera parcial, a la Ley Nacional N° 27.424, la cual determina el Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública.

El Título II Capítulo III de la Ley N° 3285 establece el “Régimen Provincial de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Eléctrica”, posteriormente reglamentado en el Anexo II del Decreto N° 1362/21. A tales fines se llevaron adelante mesas de trabajo semanales con la Administración Provincial de Energía y las Cooperativas concesionarias del servicio público eléctrico, arribando a una reglamentación acordada de manera unánime entre los distintos actores. Finalmente, por medio de la Resolución N° 29/21, la Secretaría de Energía y Minería, en su calidad de Autoridad de Aplicación, estableció las normas complementarias necesarias para la implementación del Régimen.

El marco normativo precitado sienta las bases y condiciones para posibilitar que el/la usuario/a del servicio público de energía eléctrica pueda generar su propia energía, a partir de fuentes renovables, con destino al autoconsumo y eventual inyección de los excedentes, garantizando que la energía inyectada a la red eléctrica sea adquirida por las prestadoras del servicio con la finalidad de comercializarla con otras personas usuarias. De esta manera, se garantiza a las personas usuarias el derecho de conexión de equipos de generación distribuida (EGD) a la red, bajo la condición de no afectar el SEP y calidad del servicio.

Desde la puesta en marcha del Régimen de Generación Distribuida, implementado por la Ley N° 3285, el Anexo II de su Decreto Reglamentario N° 1362/2021 y Resolución N° 29/2021 de esta Secretaría, existen ya 38 usuarios generadores que cuentan con el certificado nacional.

Dichos usuarios generadores representan una potencia instalada de 490,4 kWp, superando ampliamente esa contribución al sistema respecto de la potencia del año 2021 que era de de 131.37 Kw. La potencia que aporta al sistema la generación distribuida tiene un impacto ambiental significativo, en tanto

representa una reducción de aproximadamente 369 toneladas de dióxido de carbono en el año. A su vez, hay 32 trámites vigentes de personas usuarias que han iniciado el procedimiento para convertirse en usuarios generadores.

Por otra parte, es dable decir que de los 38 usuarios generadores que actualmente tiene La Pampa, 16 corresponden a demanda residencial y 15 a comercial, mientras que los restantes 7 pertenecen a organismos oficiales y otras categorías tarifarias. Asimismo, resulta importante resaltar que los usuarios generadores incorporados se encuentran diseminados en toda la extensión del territorio provincial, en las localidades de: 25 de Mayo, Alpachiri, Ataliva Roca, Bernardo Larroude, Catriló, Colonia Barón, Doblás, Eduardo Castex, General Campos, General Pico, Intendente Alvear, Macachin, Metileo, Quemú Quemú, Realicó, Santa Rosa, Toay, Victorica y Winifreda.

Un dato relevante a destacar es que la Provincia de La Pampa se encuentra, según reporte del Estado Nacional, posicionada en el sexto lugar en cantidad de usuarios y potencia instalada a nivel nacional, de un total de 13 provincias adheridas (Ley N° 27.424).

Esto demuestra la importancia de los avances de este régimen de generación distribuida, y el alcance territorial descentralizado del mismo, lo que ha permitido posicionar a La Pampa entre las provincias pioneras en habilitar el derecho de las personas usuarias en generar la energía para su autoconsumo, a la par que ha creado nuevos nichos en el mercado, tanto en la provisión de equipos como en su instalación y mantenimiento. Actualmente, la Provincia cuenta con 20 instaladores registrados en la plataforma nacional y matriculados en el Colegio Provincial de Ingenieros y Técnicos de La Pampa.

Por otra parte, la Secretaría de Energía y Minería una vez implementado el régimen de generación distribuida, avanzó durante el transcurso del año 2022 en la búsqueda de herramientas que aporten esquemas de financiamiento para la adquisición de EGD, entendiendo que es uno de los principales obstáculos en el avance de este Programa.

En ese sentido y en el marco del Programa de Incentivos y de Apalancamiento de las Inversiones para la Adquisición de Equipos de Generación Distribuida a partir de Fuentes Renovables, se establecieron a través de un trabajo conjunto y articulado con el Ministerio de la Producción, Consejo Federal de Inversiones (CFI) y el Fondo de Garantías Pampeanas (FOGAPAM) líneas de financiamiento para la adquisición de equipos de generación distribuida (ongrid) y generación off grid. Esas líneas fueron diseñadas en función de las necesidades de cada sector, de manera tal que posibiliten un real acceso al régimen.

CONCLUSIÓN

La importancia de contar con una política pública energética pensada a 20 años denota los desafíos y oportunidades que ofrece la transición energética de la que ninguna provincia puede permanecer ajena. En ese sentido, las metas y lineamientos del Plan Estratégico de Energía para La Pampa refuerzan y coadyuvan con los objetivos fijados por el Estado Nacional hacia una transición caracterizada por una perspectiva inclusiva, dinámica, estable, federal, soberana y sustentable.

De allí la importancia, de generar una sinergia y articulación entre los distintos actores involucrados – locales, nacionales e internacionales- para avanzar progresivamente en la diversificación de la matriz energética, con eficiencia, transparencia, participación y justicia, a través de acciones que materialicen resultados reales y medibles, en términos cualitativos y cuantitativos, que sirvan de base para proyectar nuevas líneas y achicar las brechas energéticas existentes.

Desde la implementación del Plan Estratégico de Energía para La Pampa en el año 2020 se ha logrado avanzar paulatina y progresivamente en los tres objetivos propuestos por el mismo: generar energía en la Provincia, reconvertir a Pampetrol SAPEM y gestionar la demanda energética. Los desafíos son constantes, dinámicos y se renuevan conforme las necesidades y particularidades de cada meta, sin perjuicio de lo cual podemos afirmar que el primer paso ha sido generar las líneas de base sobre las cuales identificar las necesidades energéticas y planificar las acciones y proyectos con alcance territorial descentralizado y aggiornado a la realidad e idiosincrasia de la demanda energética pampeana. A su vez, contar con Pampetrol SAPEM posibilita captar inversiones para el desarrollo de proyectos energéticos y expansión de nuevos negocios. De esta manera, se ha desarrollado una política pública signada por la equidad, procurando garantizar iguales tecnologías, oportunidades, servicio y calidad de vida en todo el territorio de la Provincia. En ese sentido, se diseñan y planifican inversiones y proyectos que promueven un servicio eléctrico estable y seguro, comprometido con la eficiencia energética y con el anhelo de que La Pampa alcance la autarquía energética en términos de balance. A modo de cierre, podemos concluir

que el balance en la gestión (2020-2022) ha ratificado que el rumbo delineado en el Plan Estratégico de Energía de producir nuestra propia energía es cada año más estratégico y competitivo, sobre todo ante un 2022 signado por aumentos de los precios estacionales de energía, un proceso de segmentación de tarifas con traslado de subsidios a la demanda de mayor vulnerabilidad, y un compromiso nacional e internacional hacia la transición energética. Por último, con el objetivo de enlazar los ejes de la oferta y la demanda, el avance y materialización de proyectos estratégicos de generación se hace cada vez más necesario y conveniente abordar acciones territoriales de gestión eficiente de la demanda.

REFERENCIAS

- Carbajales, Juan José (Coordinador) (2021) “Manual de Empresas Públicas en Argentina (1946-2020)”, Edunraz Editorial Universitaria.
- Durán. R. y Condori. M. (2015) “El acceso a la energía desde la óptica de los derechos humanos. Su medición y relación con el acceso a otros derechos elementales en Salta, Argentina”, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19, pp.12.57-12.67, ISSN 2314-1433.
- Resoluciones N° 517/23 y N° 518/23 Secretaría de Energía de la Nación
URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/> (Consulta 10/08/2023)
- Ley N° 3.285. Ley Yolanda. Adhesión provincial a la Ley Nacional 27.592.

INSTRUMENTS AND CHALLENGES OF ENERGY PUBLIC POLICY IN THE PROVINCE OF LA PAMPA

ABSTRACT: The purpose of this document is to present the guidelines, goals and actions of the Strategic Energy Plan that the Province of La Pampa is carrying out, since the approval of the Energy Development Regime sanctioned by Provincial Law No. 3285 in the year 2020. Likewise, the development of the transition objectives of the public energy policy of the province is intended, which -in step with the commitments to decarbonise the national and international energy matrix-, focus on promoting the generation of electrical energy from clean sources and renewables under a public and private investment scheme that allows meeting the supply demand, from a decentralized and efficient perspective of the system as a whole.

Keywords: strategic plan, energy transition, renewable energy, efficiency.

DISEÑO, CONTRUCCIÓN Y ENSAYO DE UN CONCENTRADOR SOLAR CILINDROPARABÓLICO PARA FINES EDUCATIVOS

Pablo Dellicompagni, Aien Salvo, Mónica Rojas Villena

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina. pabldellicompagni@gmail.com, aienweni@gmail.com, mireya_villena@yahoo.com.ar

RESUMEN: El artículo aborda el estado actual de los sistemas de concentración solar y su aceptación en la generación de energía, destacando cuatro diseños predominantes: torre central, cilindroparabólico, Fresnel lineal y disco parabólico. En el ámbito global, la capacidad instalada de concentración solar en 2021 fue de 6387 MW_e, con una disminución del 2% respecto a 2020 debido a la competencia de la energía fotovoltaica. Sin embargo se pronostica un crecimiento prometedor hacia 2050. A nivel nacional, diversos actores como INENCO y LOCE participan en proyectos de concentración solar. Se subraya la integración de esta temática en programas académicos de la Universidad de Salta, incluyendo posgrados y carreras de energías renovables. Este artículo presenta el proceso de diseño, construcción y pruebas de un concentrador solar cilindroparabólico a pequeña escala para calentar agua, desarrollado en la Tecnicatura Universitaria en Energía Solar de Cafayate. Se empleó software de diseño y se utilizaron materiales locales. Las mediciones experimentales demuestran la eficacia del concentrador, alcanzando 70°C con una eficiencia global pico del 30% y un coeficiente de pérdida promedio de 166 (W/m²C). Además, se evalúa la experiencia de aprendizaje a través de encuestas a los estudiantes involucrados, con enfoque pedagógico, en la transferencia del conocimiento y tecnológico.

Palabras claves: concentración solar, generación de energía, Tecnicatura Universitaria en Energía Solar, transferencia de conocimiento, aprendizaje.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de concentración solar poseen un alto grado de maduración actualmente siendo cuatro los diseños que mayor aceptación tienen en el campo de la generación de energía: torre central, cilindroparabólico, Fresnel lineal y disco parabólico. Según el último reporte estadístico de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2022), la capacidad de potencia instalada total de las tecnologías de concentración para generación de energía eléctrica para el 2021 fue 6387 MW_e, registrándose un descenso del 2% entre 2020 y 2021 para llegar al mencionado valor. Las tasas de crecimiento y decrecimiento en la capacidad instalada se observan en la Fig. 1.a. El decremento registrado a la par de los incrementos cada vez menores, se deben principalmente al desbalance entre las cantidades de plantas que entran en funcionamiento versus las que salen de operación; combinadas con las caídas en los precios de generación eléctrica mediante tecnología fotovoltaica, situándose esta última en 0.048 USD/kWh versus 0.114 USD/kWh para solartérmico de concentración (IRENA, 2022), ver Fig. 1.b-c. No obstante, la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022) muestra en sus reportes un escenario promisorio para el crecimiento de la capacidad instalada hacia el año 2050 de alrededor de 500 GW_e.

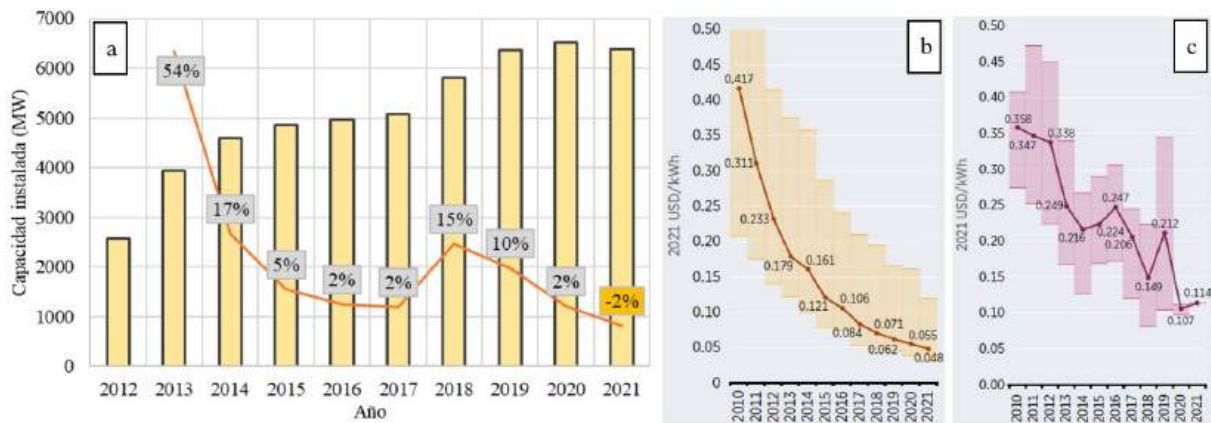


Figura 1: (a) capacidad de potencia instalada mundial, sobre la base de sistemas de concentración solar para generación de energía eléctrica, (b) costo nivelado de generación de energía para tecnología fotovoltaica, (c) costo nivelado de generación de energía para tecnología solartérmica.

En un marco nacional, se identificaron algunos actores que participan en la temática, ya sea a través de financiamientos nacionales, privados o combinación de ellas. Se puede mencionar al Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), cuyos investigadores llevan adelante diversos proyectos, como ser Proyectos de Investigación Científica y Tecnológica (PICT), proyectos a través del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA) y del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC) referidos a concentración solar, principalmente cilindroparabólico, heliostatos de concentración y Fresnel lineal, respectivamente (Placco et al., 2019; Dellicompagni et al., 2019); no obstante, todos ellos con el propósito de generar energía térmica para la industria en general (minería, láctea, entre otras). También se puede mencionar al Laboratorio de Óptica, Calibraciones y Ensayos (LOCE) que ha incursionado en tecnologías de concentración cilindroparabólica y disco parabólico (Panaroni et al., 2017, Panaroni et al., 2020). Otros actores nacionales como Jujuy Energía Minería S. E. (JEMSE) e INVAP realizaron estudios de factibilidad para instalar una planta solar de torre central híbrida fotovoltaica en la Puna jujeña con vistas de diseño, construcción y comercialización en el mercado nacional, e incluso competir en el mundo (JEMSE, 2021). Las mencionadas líneas de investigación y desarrollo abren una oportunidad de aprendizaje al alcance de quienes se muestran interesados en participar en este tipo de proyectos, ya sea por interés propio o bien por poseer una trayectoria en las diversas temáticas referidas a concentración solar (Prieto Ríos, 2022; Niño Velásquez et al., 2020). En este marco, se ha comenzado a implementar la temática en los currículos de formación de grado y posgrado. En particular, en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Salta se dictan carreras de posgrado como ser Doctorado en Ciencias-Área Energías Renovables (Res. CS-317/98), Especialización en Energías Renovables (Res. CS-134/21) y la Maestría en Energías Renovables, cuyo nuevo plan de estudio se encuentra actualmente en proceso de evaluación por parte del Ministerio de Educación (<https://exactas.unsa.edu.ar/postgrado>). Además, en la misma facultad se encuentra como oferta académica la Tecnicatura Universitaria en Energía Solar, tanto en sede central de la Universidad, como en la extensión áulica de la ciudad de Cafayate (Res. CS N°144/2012) (<https://exactas.unsa.edu.ar/carreras/info/9>). Estas carreras contemplan el dictado de cursos de posgrado y asignaturas dentro de los cuales, en la rama de energía solar, se incluyen los conceptos asociados a la energía solar de concentración.

En este trabajo se muestra el diseño, construcción, ensayo y significancia en el proceso educativo de un concentrador solar cilindroparabólico de baja escala para calentamiento de agua, empleado para afianzar conceptos referidos a la concentración solar desde la práctica de laboratorio en la esfera de dictado de la Tecnicatura Universitaria en Energía Solar, extensión áulica Cafayate. El diseño se realizó mediante software geométrico y de trazado de rayos Geogebra®, empleándose para la construcción materiales disponibles en el mercado local. Se realizaron mediciones experimentales que permiten caracterizar al concentrador, tomando datos de temperatura, irradiancia directa normal al haz y velocidad de viento. Los ensayos realizados indican que el concentrador es capaz de calentar agua a 70°C, con una eficiencia global pico de 30% y un coeficiente global de pérdida promedio de 166 (W/m²C). Se realizó a su vez la evaluación de la experiencia de aprendizaje realizada mediante encuestas a alumnos participantes de la actividad académica.

MÉTODOS Y MATERIALES

Diseño y construcción del equipo concentrador

Se empleó el programa Geogebra® para el diseño geométrico del perfil parabólico. Como se indica en la Fig. 2, la distancia focal AD es de 0.23 m mientras que la apertura BC de la parábola a la altura del foco es de 0.9 m. La profundidad o largo de la superficie reflectiva es de 1 m. Este programa permite emular el recorrido de los haces solares incidentes y reflejados, como así también obtener la ecuación del perfil parabólico.

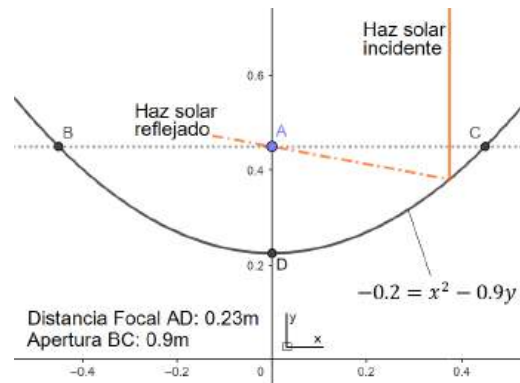


Figura 2: diseño geométrico en Geogebra®. Trazado del perfil parabólico del concentrador, emulación de los haces solares y determinación de la distancia focal, apertura y ecuación de perfil.

La ecuación del perfil parabólico permitió diseñar la estructura metálica de soporte que contiene la curvatura, en la cual se asienta la superficie reflectiva. Esta última se construyó empleando chapa de aluminio pulido de alta reflectividad. La Fig. 3 muestra al concentrador construido. El absorbedor consiste de un caño estructural rectangular cortado a la mitad y pintado con pintura color negra mate, de alta temperatura. En los extremos del absorbedor se disponen los ejes de apoyo y rotación, de tal manera que éste se posiciona sobre la línea focal del concentrador sin volcarse, a medida que se realiza el seguimiento solar. El absorbedor tiene capacidad para alojar 1 litro de agua, y se carga manualmente por la parte superior. El segundo eje de rotación es aquel que posee la estructura de soporte del concentrador y se vincula con los parantes verticales, para conferirle al equipo la inclinación según la altura solar. El bastidor inferior posee dos ruedas giratorias y otras dos ruedas fijas, para mover el equipo siguiendo el azimut solar.



Figura 3. Concentrador cilindroparábólico construido y orientado hacia el sol.

Arreglo experimental y mediciones realizadas

El montaje del equipo es relativamente sencillo. Se coloca la estructura del concentrador acoplando los ejes de rotación en los parantes del bastidor. El enfoque se realiza manualmente, direccionando el concentrador tanto en dirección acimutal como en la inclinación necesaria en función de la altura solar. Se toman las sombras proyectadas por la estructura como referencia del correcto enfoque como así la imagen formada sobre el absorbedor. En cuanto a las mediciones realizadas, se tomaron datos de temperatura mediante termocuplas tipo k (ambiente y agua contenida en el absorbedor) y un termómetro Fluke® para la toma de los datos. Mediante el empleo de una cámara termográfica Testo® se

determinaron las temperaturas promedio del absorbedor de la parte posterior, anterior e inferior, para evaluar el coeficiente global de pérdidas al medio ambiente. Los datos de irradiancia directa normal al haz se tomaron por medio de un pirheliómetro Eppley®. Se empleó un anemómetro de hilo caliente TES® para medir la velocidad del viento en cercanías del equipo ensayado.

Se realizaron las mediciones de los parámetros mencionados, desde un estado térmico *frio*, hasta que el equipo alcanzó su régimen permanente, alrededor de los 70°C en el agua contenida. Cada ensayo se realizó en el lapso de una hora, en promedio. El descenso del nivel de agua en el absorbedor se determinó midiendo al comienzo y al final de cada ensayo, con una regla milimétrica. La tasa de evaporación media se determinó con la Ec. (1).

$$\dot{m} = \frac{m_{in} - \delta * l * a * (h_i - h_f)}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde.

- \dot{m} : tasa de evaporación media, kg/min,
- m_{in} : masa inicial, kg.
- δ : densidad del agua, asumida 1000 kg/m³,
- l : longitud del absorbedor, m,
- a : ancho del absorbedor, m,
- h_f : nivel final de agua, m,
- h_i : nivel inicial de agua, m,
- Δt : tiempo total del ensayo, min.

Dado que el volumen de agua desciende conforme se realiza el ensayo, la masa de agua m_i se determina considerando la tasa de evaporación \dot{m} y el periodo de tiempo transcurrido entre mediciones Δt_i , teniendo en cuenta la masa de agua de la medición previa m_{i-1} . La Ec. (2) determina la masa de agua para cada medición.

$$m_i = m_{i-1} - \dot{m} * \Delta t_i \quad (2)$$

Con respecto a la medición de temperaturas, se colocó una termocupla en el seno central del agua adentro del absorbedor, y otra termocupla por detrás de la superficie reflectiva, para medir la temperatura ambiente. La temperatura de las caras del absorbedor se midió con la cámara infrarroja y luego los datos se procesaron con el software correspondiente.

Rendimiento del concentrador

La Ec. (3) permite determinar el rendimiento solar-térmico global del concentrador, en términos de la energía térmica transferida al agua con respecto a la energía solar acumulada en el tiempo transcurrido entre mediciones.

$$\eta_i = \frac{E_{t,i} + E_{t,i-1}}{E_{s,i} + E_{s,i-1}} \quad (3)$$

Donde.

- $E_{t,i}$: es la energía térmica de la *iésima* medición, absorbida por el agua, J,
- $E_{t,i-1}$: es la energía térmica de la medición anterior a la *iésima*, J,
- $E_{s,i}$: es la energía solar acumulada en la *iésima* medición, J,
- $E_{s,i-1}$: es la energía solar de la medición anterior a la *iésima*, J.

Para cada medición, la energía térmica acumulada en el lapso de tiempo transcurrido se determina mediante la Ec. (4)., donde C_p es el calor específico del agua, adoptado igual a 4186 J/kg°C, $T_{f,i}$ y $T_{i,i}$ son las temperaturas final e inicial del agua, respectivamente. La Ec. (5) determina la energía solar

acumulada durante el período de medición Δt_i , donde I_i es la irradiancia directa normal al haz y A_c es el área de apertura del concentrador.

$$E_{t,i} = C_p * m_i * (T_{f,i} - T_{i,i}) \quad (4)$$

$$E_{s,i} = I_i * A_c * \Delta t_i \quad (5)$$

La diferencia de temperatura entre el absorbedor y el ambiente en conjunto con la evaporación de agua conforman los principales mecanismos de pérdida de calor. El coeficiente global de pérdida U_L se determina del balance de energía del equipo. Este balance esta dado por la Ec. (6), en la que $E_{v,i}$ es la pérdida de calor por evaporación de agua dado por la Ec. (7) y E_{UL} involucra las pérdidas de calor debidas a U_L (Duffie and Beckman, 2013; Bergman et al., 2011). El coeficiente h_v es el calor de cambio de estado del agua, adoptado como $h_v=2257$ kJ/kg. Finalmente, la Ec. (8) determina el coeficiente global de pérdida del equipo U_L en $W/m^2\text{°C}$, en la que A_a es el área total del absorbedor, $T_{ab,i}$ es la temperatura promedio de las caras externas del absorbedor, medidas con la cámara infrarroja y $T_{a,i}$ es la temperatura ambiente.

$$E_{UL,i} = E_{s,i} - E_{t,i} - E_{v,i} \quad (6)$$

$$E_{v,i} = \dot{m} * \Delta t_i * h_v \quad (7)$$

$$U_{L,i} = \frac{E_{UL,i}}{\Delta t_i * A_a * (T_{ab,i} - T_{a,i})} \quad (8)$$

En régimen permanente, este coeficiente U_L se estabiliza en un valor determinado por las cantidades de energía puestas en juego, pudiendo registrarse oscilaciones en la medida de que depende fundamentalmente de la acción del viento sobre las caras del absorbedor, lo que se traduce en una disminución de $T_{ab,i}$ y por ende el cociente de la Ec. (8) aumenta su valor, al disminuir el denominador. En este trabajo no se analiza la migración de las moléculas de vapor hacia el ambiente propiciado por la acción del viento. No obstante, el descenso del nivel de agua medido con la regla milimétrica contempla implícitamente todos los mecanismos de migración de vapor.

Entrevista realizada

Para conocer el proceso de aprendizaje a lo largo de la materia desde el punto de vista del alumnado, y en especial lo referido al laboratorio realizado con el concentrador solar cilíndrico parabólico educativo hasta aquí detallado, es que se confeccionó y realizó una entrevista semiestructurada, teórica y de carácter anónimo sobre la base de tres ejes: Eje 1 – Sobre el cursado de la materia, Eje 2 – Sobre la nueva tecnología y Eje 3 – sobre los aprendizajes. La misma se realizó de manera virtual.

RESULTADOS

Caracterización térmica del concentrador

Los ensayos se realizaron en tres días claros, denominándose primer, segundo y tercer ensayo para los días 5 de octubre de 2022, 11 de abril de 2023 y 23 de junio de 2023, respectivamente. Con respecto a la respuesta térmica del agua dentro del absorbedor, el equipo es capaz de elevar su temperatura hasta los 70 °C. Luego, este valor se estabiliza pasados los 15 minutos desde que se produce el inicio de los ensayos como se observa en la Fig. 4 - izquierda. A partir de allí, puede verse que el rendimiento global (Fig. 4) decae a valores muy bajos con tendencia a nulos. Esto se debe a que cada paquete de energía térmica que absorbe el agua se insume en el proceso de evaporación, no llegando a la ebullición. Resulta pues que el balance energético recae en que la energía solar que llega al absorbedor se dispersa en pérdidas hacia el ambiente.

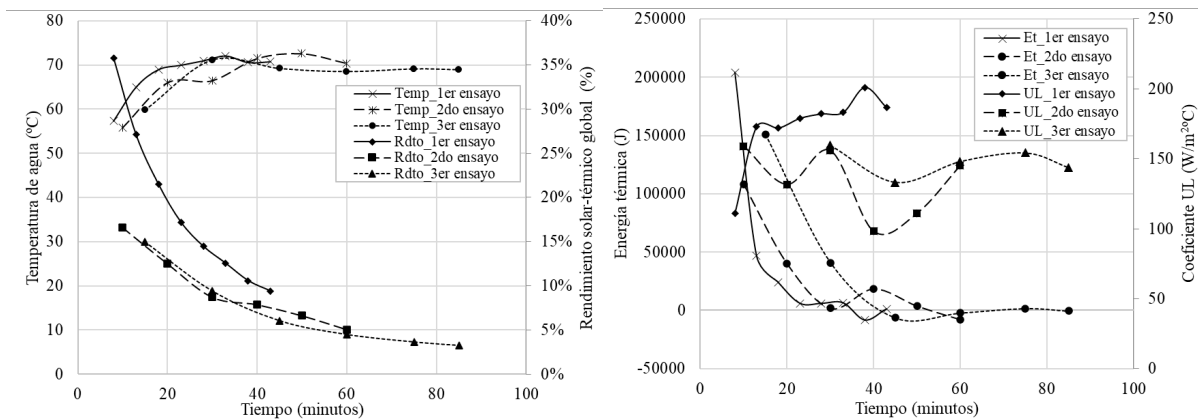


Figura 4. Izquierda: Desempeño térmico del absorbedor, en términos de la temperatura alcanzada por el agua y el rendimiento global solar-térmico. Derecha: Energía térmica transferida al agua y coeficiente global de pérdidas hacia el ambiente, para cada periodo medido.

La Fig. 4 – derecha, pone en evidencia lo mencionado en el párrafo anterior. Se observa que la ganancia de energía térmica es cada vez menor, dado que los incrementos de temperatura son cada vez menores, e inclusive en algunos casos existen descensos de temperatura, llegando el calor absorbido a valores nulos. En esta misma figura, puede verse que el coeficiente global de pérdidas varía en una franja de 100 a 200 W/m²C, con un valor promedio -entre los tres ensayos- de 166 W/m²C.

Mirada al proceso pedagógico

“Enseñar no es transferir conocimiento, sino crear las posibilidades para su propia producción o construcción” (Freire, 1997). Situada en la provincia de Salta, se encuentra una de las sedes de la Universidad Nacional de Salta, en la que se brinda la Tecnicatura Universitaria en Energía Solar y una de sus materias es Energía Solar Térmica I. Esta carrera está pensada en función al contexto, la ciudad de Cafayate, que es emblema de la producción de vinos de gran calidad la cual depende de la amplitud térmica y gran radiación solar. Es así que este lugar cuenta con plantas solares e innovaciones tecnológicas destinadas al aprovechamiento del recurso. Con respecto a los ejes temáticos abordados en la entrevista realizada al alumnado, se arribaron a los siguientes resultados.

Eje 1. Sobre el dictado de la materia. Desde lo pedagógico, es importante analizar este espacio curricular por las implicancias que el mismo tiene en la formación de la tecnicatura. La propuesta pedagógica está basada en un ida y vuelta permanente entre la teoría y la práctica. En este sentido, la estructura de la cátedra le da mucha importancia a lo que se denominan laboratorios, espacios en los que se sintetizan y aplican los conceptos aprendidos a lo largo de la materia. También cumplen la función de desarrollar las habilidades que les serán requeridas como futuros técnicos y técnicas. El laboratorio de concentración solar parte de un marco teórico, la descripción y desarrollo experimental del equipo, el cálculo de diferentes parámetros de eficiencia y desempeño, la construcción de datos con los mismos y su posterior lectura, que permite establecer conclusiones y desarrollar el sentido crítico.

Apelando a la frase de Freire (1997) que precede este apartado, se puede afirmar que lo importante es posibilitar las condiciones para la creación del conocimiento, no solo desde lo teórico sino también desde una postura dialógica entre docentes y alumnos, en vista de que todo proceso de aprendizaje está relacionado con una forma de ver el mundo desde el espacio áulico.

Desde el punto de vista de la enseñanza de la materia, se puede decir que las prácticas docentes, las prácticas de la enseñanza, parten de una actividad que todo docente conoce y que se denomina planificación, y para ello evidentemente no basta con señalar solo los objetivos, los contenidos, las actividades y los métodos. En su construcción, para el caso de la materia que se está presentando, también ha sido fundamental pensar en los tiempos, el espacio y el contexto de los alumnos y las alumnas puesto que varios de ellos proceden de comunidades cercanas – o no – a Cafayate, los escenarios y las escenas posibles a las estrategias que se van a desarrollar en el aula, los espacios, el uso de nuevas

tecnologías etc. Por lo tanto, la planificación de la cátedra se ha hecho desde una mirada y un abordaje epistemológico situado y complejo, en línea con lo establecido por Brailovsky (2019): *“La planificación es el punto de partida para ordenar las ideas y para conversar con otros sobre ese intento, ese deseo. La enseñanza se mueve al ritmo de las conversaciones, los tropiezos, los ajustes, las dudas, las reconsideraciones (...) la enseñanza, sea como fuere que se organice y se anticipe se caracteriza por ser un espacio de descubrimiento en el que rigen las reglas de la conversación (orientada, contextualizada, pero conversación al fin) antes que el método”*.

Si bien es cierto que, dado al proceso de deserción de estudiantes debido al periodo de duración de la pandemia, la continuación de un número acotado de alumnos en el régimen presencial resultó, desde un cierto enfoque, en el desarrollo de la enseñanza en un proceso literalmente personalizado, donde lo dialógico es la característica privilegiada de la misma, es así que la alumna en cuestión, señala:

“La manera de dictar la clase explicando de forma clara con ejemplos haciéndola más entretenida e interesante, donde también compartían sus experiencias vividas en el ámbito laboral. La teoría con la práctica se combinaba bastante bien, al terminar la parte teórica se continuaba con la práctica para aplicar todo lo visto. Con la presencia de ambos docentes por si surgía alguna duda referida a la teoría me pareció bastante bueno” (Alumna 1, cátedra Energía Solar 1, 2023).

También es importante señalar que el contrato didáctico, entendido como los acuerdos iniciales que van a regir las interacciones y actividades, fue claro y consensuado desde el inicio. Esto no es una cuestión menor en tanto ordena las interacciones, da claridad en torno a lo que se espera y crea un clima de respeto en el dictado de la materia.

“En mi caso el cursado de esta materia fue de manera condicional y presencial los días viernes y sábados. Con la realización de dos laboratorios en el cuatrimestre. La presentación de los contenidos de la materia desde un principio fue clara, dejando en claro la modalidad del dictado de clases, los medios para realizar las consultas y el material a utilizar”. (Alumna 1, cátedra Energía Solar 1, 2023).

Eje 2. Sobre la nueva tecnología: En relación a la enseñanza de una nueva tecnología, hay una permanente relación entre el conocimiento tecnológico y la investigación porque si bien en el programa de cátedra, no se explicita de manera directa, se dan procesos investigativos, parten de la pregunta y pretende desarticular el objeto que se construye y se analiza. Como característica interesante es que se incluyen en el aula los resultados de las propias investigaciones de los docentes por lo que en el espacio áulico confluyen la producción, la recontextualización y la reproducción del conocimiento.

Es evidente que la parte que resulta más interesante es la construcción de la tecnología, es decir, el diseño del prototipo, la elección de los materiales y el ensamblaje, así como el ensayo realizado.

“Los pasos más gratificantes fueron el diseño y la elección de los materiales y la parte más complicada me pareció que fue el ensamblaje del equipo. No se tuvieron los materiales que quisiéramos haber utilizado, ya sea por la dificultad para conseguirlos ya sea por sus costos, etc. Pero se pudo llegar a obtener una experiencia satisfactoria con lo que teníamos al alcance.” (Alumna 1, cátedra Energía Solar 1, 2023).

Eje 3. Sobre los aprendizajes: Finalmente, en torno a los aprendizajes, las anteriores consideraciones confluyeron que el cursado de la materia fue significativa en tanto *“introdujo de lleno a todo lo que significa el mundo del aprovechamiento de la energía solar (...) con la cual termine de confirmar que no me equivoque en la elección de la carrera (...). Poder saber leer y comprender una carta psicométrica. (...), aprendí un nuevo tipo de tecnología que era desconocido en mi caso. No me imaginaba de qué otra manera se podía aprovechar la energía solar.”* (Alumna 1, cátedra Energía Solar 1, 2023).

También es importante señalar que los aprendizajes previos fueron importantes en el cursado de la materia, por lo que los conocimientos previos adquiridos en el primer año, sí funcionaron y fueron significativos para comprender y aprehender el contenido. “*Totalmente, todos los conocimientos que adquirí en el 1er año de la carrera fueron fundamentales para entender la materia.*” (Alumna 1).

DISCUSION

La metodología abordada para la enseñanza y prácticas de laboratorio se centran en una planificación previa al periodo de cursado, basada en los requerimientos de contenidos mínimos que el alumnado debe adquirir al finalizar la asignatura. Principalmente, al tratarse de una Tecnicatura Universitaria, prima la importancia de que los conocimientos adquiridos sean de orden técnico y práctico, pero con estrecha relación con los contenidos teóricos mínimos e indispensables para comprender el funcionamiento de las tecnologías abordadas. En el caso particular de la tecnología seleccionada (concentrador solar), ésta surge como consecuencia de un proyecto de investigación, fuera de la esfera de la Tecnicatura, pero abordada por el cuerpo docente, que contempla el diseño, construcción y ensayo de tecnologías de mayor tamaño. Los hallazgos dentro de dicho proyecto contribuyen a la adopción de herramientas conceptuales como así metodológicas para ser vertidas en la práctica de la enseñanza áulica y en las prácticas de laboratorio. Se resalta la relación entre la actividad docente para con la actividad investigativa científica, y viceversa. Si bien el alumnado no participa de forma directa en los procesos de diseño de las tecnologías, la dinámica de la enseñanza permitió la aprehensión del conocimiento sobre el diseño por parte del alumnado. Esto facilita el desarrollo de capacidades técnico-constructivas para confeccionar tecnologías similares. En este sentido, se fortalece el desafío cognitivo al proponer al alumnado interrogantes, como por ejemplo, ¿cómo mejorar la eficiencia térmica del equipo construido?, o bien ¿qué materiales podrían ser convenientes para el rediseño de las partes constitutivas del concentrador?

Por otro lado, de los resultados a raíz de la encuesta realizada, se destaca que la falta de motivación es una de las principales causas de la dificultad para el aprendizaje en ciencias. Los alumnos no aprenden porque no están motivados, y no están motivados porque no aprenden. La motivación es una condición compartida entre los alumnos y la educación que reciben, haciendo énfasis en el acierto en las decisiones metodológicas para tal fin. Un tema actual y bien trabajado puede ayudar a motivar a los estudiantes. Cuando los estudiantes se expresan positivamente sobre su carrera, están expresando que han encontrado sentido en la labor docente. Para el docente, el sentido está en la aceptación y el interés de los estudiantes. Para el estudiante, el sentido está en el interés que despierta en él la tarea que está realizando.

CONCLUSIONES

Acerca del concentrador solar

Se diseñó, construyó y ensayó un sistema de concentración solar cilindro parabólico de pequeña escala para el calentamiento de agua. El diseño se realizó con la utilización de un software geométrico de acceso libre. La construcción fue llevada a cabo con materiales de fácil obtención en el mercado local, no siendo necesaria la incorporación de subsistemas complejos como ser el seguimiento solar, dada la finalidad pedagógica del equipo.

Los resultados experimentales indican que el concentrador es capaz de calentar agua hasta 70°C en valores promedios. Posee un alta constante entrada en régimen, lo que indica el correcto diseño geométrico y las bajas pérdidas por desenfoque y difusión de haces solares reflejados. Así mismo, el agua contenida en el absorbedor no alcanza a hervir debido a las elevadas pérdidas, principalmente de tipo convectivo, ocasionadas por estar el fluido caloportador y el absorbedor propiamente dicho en contacto con el aire atmosférico. Se registró un coeficiente global de pérdidas $U_L=166 \text{ W/m}^2\text{C}$, considerado elevado para este tipo de tecnologías.

La eficiencia global máxima alcanzada por el equipo concentrador fue del orden del 35% en régimen transitorio, decayendo a valores casi nulos en régimen permanente. Esto tiene explicación en el hecho

de que casi todo el calor absorbido se pierde al ambiente por evaporación, convección y radiación. No obstante, los resultados experimentales desde el punto de vista de funcionamiento y de la aplicación del equipo, se consideran satisfactorios.

Acerca de la evaluación pedagógica

Se puede decir que la experiencia de dictado de una materia que tiene que ver con la incorporación de nuevas tecnologías en torno a los recursos naturales supone un continuo ejercicio para moverse entre el conocimiento teórico y el práctico, preguntar, reflexionar, repensar y repensarse.

Tal como lo plantea Domingo Contreras (2006), es importante que al pensarse como educador se piense también que se es mediador, que no significa ser un mero intermediario, más bien pensarse como mediador entre los sujetos de aprendizaje, lo que cada uno y una porta como conocimiento, como experiencia, y lo que con ellos se quiere compartir y co-crear.

“Al fin y al cabo, lo que enseñamos, lo que mostramos y nuestros alumnos ven, es nuestra relación con el saber, lo que es saber para nosotros: si es algo encarnado o despersonalizado, si es fijo e inmutable o cuestionable, si nos permite disfrutar y crear o sólo sufrir y aceptar, etc. Y lo que aprenden siempre es también lo que el saber significa para ellos y para la vida. Enseñar en primera persona es por tanto, también enseñar la relación con el saber, el uso, y la creación de nuevo saber en la forma de interrogarse e inquirir. (...). Lo que enseñamos no es sólo el mundo, sino una manera de mirar al mundo, y lo que aprenden nuestros estudiantes no es sólo una manera de mirar al mundo, sino lo que les mostramos, lo que les enseñamos: alguien que mira al mundo, alguien que, si se ha sentido autorizado/a y se ha atrevido a interrogarse libremente sobre las cosas, muestra el camino, autorizándolo, en el uso y en la creación y recreación del saber. Siempre nos enseñamos, porque lo que en el fondo enseñamos es nuestra experiencia de saber” (Domingo Contreras, 2006).

REFERENCIAS

- Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P. and Dewitt D. P. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. Jhon Wiley and Sons, 2011. ISBN 13 978-0470-50197-9.
- Brailovsky, D. (2019). *Pedagogía (entre paréntesis)* (pág. 264). Buenos Aires: Novedades Educativas. ISBN 9789875386648.
- Dellicompagni P., Franco J., Flexer V. (2019). Reducción de emisiones en la industria de litio en la Puna Argentina mediante tecnologías solares de concentración. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 23, pp 06.01-06.11, 2019. ISSN 2314-1433.
- Domingo Contreras J. (2006). La libertad que tenemos y la que necesitamos. Barcelona.
- Duffie, J. A. y Beckman W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Chichester: John Wiley and 688 Sons Ltd.
- Freire P. (1997). Pedagogía de la autonomía. Saberes para la práctica educativa. Siglo XXI Editores. México. ISBN 968-23-2069-0.
- IEA. (2022). World Energy Outlook 2022.
- IRENA. (2022). Renewable Energy Statistics 2022. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-8.
- IRENA. (2022). Renewable Power Generation Costs in 2021. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-452-3.
- JEMSE. (2021). Artículo: JEMSE proyecta construir y vender usinas híbridas con INVAP. Disponible en <https://jemse.gov.ar/2021/04/29/jemse-proyecta-construir-y-vender-usinas-hibridas-con-invap/>, ultimo acceso: 30 de marzo de 2023.
- Niño Velásquez J. F., Sanabria Mahecha G., Montealegre Melo K. P. (2020). Estrategias de aprendizaje activo aplicadas al proceso de enseñanza de las energías renovables en introducción a la ingeniería. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería. <https://doi.org/10.26507/ponencia.740>.
- Panaroni D., Castro Luna A., Martorelli L. (2020). Obtención de la eficiencia óptica de un disco parabólico mediante método SHOT modificado. AJEA – Actas de Jornadas y Eventos Académicos

- de UTNV. Jornadas de Intercambio y Difusión de los Resultados de Investigaciones de los Doctorandos en Ingeniería. ISBN: 978-950-42-0200-4. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.684.2020>.
- Panaroni D., Mujica M., Abal Matos M., Corujo L., Cervini F., Castro Luna A., Martorelli L. (2017). Diseño óptico de un colector cilíndrico parabólico inclinado para generación directa de vapor. IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017.
- Placco C., Gea M., Casimiro R., Hongn M., Fernández C., Suligoy H., Lacuadra D. (2019). Construcción y ensayos de un helióstato de foco lineal para un horno solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 23, pp 02.45-02.56, 2019. ISSN 2314-1433.
- Prieto Ríos C. (2022). Ciclo de Mejora en el Aula (CIMA) en el estudio de la tecnología de concentración solar como clave de la descarbonización. Fase II. Ciclos de mejora en el aula. Año 2021: experiencias de innovación docente de la Universidad de Sevilla. pp. 2315-2331. ISBN/ISSN 978-84-472-2286-5. <https://doi.org/10.12795/9788447222865.132>.

DESIGN, CONSTRUCTION AND TEST OF A CILINDROPARABOLIC SOLAR CONCENTRATOR FOR EDUCATIONAL PURPOSES

ABSTRACT: This article addresses the current state of solar concentration systems and their acceptance in energy generation, highlighting four predominant designs: central tower, parabolic trough, linear Fresnel, and parabolic dish. Globally, the installed capacity of solar concentration reached 6387 MWe in 2021, with a 2% decrease compared to 2020 due to photovoltaic energy competition. However, a promising growth trend is projected towards 2050. Nationally, various stakeholders such as INENCO and LOCE are engaged in solar concentration projects. The integration of this theme into academic programs at the University of Salta is underscored, encompassing postgraduate degrees and renewable energy courses. This article presents the process of designing, constructing, and testing a small-scale cylindrical parabolic solar concentrator for water heating, developed within the University Technical Degree in Solar Energy in Cafayate. Geogebra[®] geometric and ray tracing software were employed for design, utilizing locally available materials for construction. Experimental measurements demonstrate the effectiveness, achieving 70°C with a peak overall efficiency of 30% and an average heat loss coefficient of 166 (W/m²°C). Furthermore, the learning experience is evaluated through surveys conducted among participating students, emphasizing a pedagogical focus on knowledge and technological transfer.

Key words: solar concentration, energy generation, University Technical Degree in Solar Energy, knowledge transferring, learning.

REFLEXIONES EN TORNO AL TRAYECTO SINERGICO DE LA RED TEMÁTICA REBIBIR Y SU ESTRATEGIA COMUNICACIONAL PARA LA PROMOCION DEL USO DE BIOMASA Y BIOENERGÍA EN IBEROAMERICA.

**Camila Binda Galindez^{1,2}, Aien W. Salvo¹, Silvina M. Manrique^{1,3}, Verónica M. Javi^{1,2},
Flores Villafañe⁴, Beatriz Balderrama¹**

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET),
Universidad Nacional de Salta,

²Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA).

³Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá, E-28871, Alcalá
de Henares, Madrid, España.

⁴Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Provincia de Salta
E mail: camilabindag@gmail.com

RESUMEN: Tras 5 años (2019-2023) de actividad de la Red ReBiBiR, se reflexiona sobre las acciones comunicacionales desarrolladas como parte de su estrategia de trabajo, cuantificando y analizando su rendimiento como un proxy del impacto del trabajo sinérgico realizado. Una línea temporal muestra por año la categorización de las acciones: cursos de posgrado, eventos organizados, proyectos gestionados, webinarios realizados, vinculaciones y estancias promovidas. Se evalúan en el tiempo métricas de redes sociales: WordPress, Facebook, LinkedIn, Instagram, Twitter. Se hace un análisis de herramientas web: Reporte Nibbler, Hubspot grader, Woorank, Foro Google Groups. A su vez, se comparten los resultados obtenidos de la aplicación de una encuesta a los referentes institucionales miembros de la Red que permite exponer las percepciones en torno a los objetivos, la comunicación, y las proyecciones a futuro para sostener la sinergia conseguida. Se evidencia un desarrollo positivo y sostenido en las acciones comunicacionales y en la conformación de una comunidad virtual comprometida con el uso eficiente de la biomasa y la bioenergía rural en Iberoamérica. Se concluye que el entorno digital y el uso de plataformas han permitido visibilidad, participación regional y crecimiento continuo del alcance e impacto de la Red.

Palabras clave: analíticas de redes sociales, autoevaluación, estrategias comunicacionales, red temática, tecnologías de biomasa, sinergia.

INTRODUCCIÓN

La Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR - T), comienza a funcionar en 2019, bajo la coordinación de la Dra. Silvina M. Manrique desde el INENCO (Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional), Salta, Argentina. Actualmente está integrada por más de 230 personas pertenecientes a 25 grupos distribuidos en 12 países (Fig.1). Tiene por objetivos promover el uso y manejo eficiente de la biomasa sólida y su valorización energética en el ámbito rural y urbano-marginal iberoamericano, gestionando y desarrollando conocimientos puestos a disposición en la región a fin de aportar a la construcción sinérgica de comunidades y territorios más sustentables y resilientes frente al cambio climático (Manrique S, 2019).

Las Redes Temáticas son una de las modalidades de cooperación multilateral del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), que se define como un programa de cooperación científica y tecnológica, arraigado en el ámbito iberoamericano de carácter horizontal y orientado al desarrollo. Está conformado y financiado por los gobiernos de cada estado miembro y aborda temas relevantes de la región agrupados en siete áreas: Agroalimentación, Salud, Promoción del Desarrollo Industrial, Desarrollo Sostenible, Cambio Global y Ecosistemas, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Ciencia y Sociedad y Energía.



Fig. 1 Distribución geográfica de países miembros de la Red ReBiBiR. Fuente: Propia

Desde el comienzo de la Red REBIBIR, se propuso la realización de una autoevaluación anual que pudiera dar cuenta del trayecto experimentado con el fin de tener diagnósticos actualizados para seguir proyectando actividades que contribuyan con los objetivos planificados. En este sentido, se han publicado varios artículos desde el año 2019, bajo la modalidad de autoevaluación a partir de la aplicación de diferentes metodologías (Manrique et al., 2019; Javi et. al, 2020; Javi, et al, 2021; Manrique, 2021; Manrique et al., 2022). Por lo que, en el presente trabajo se propone lograr una sistematización de las autoevaluaciones, que pueda dar cuenta de las estrategias de interacción y producción aplicadas, desde el año 2019 hasta la actualidad.

Se revisan las acciones desarrolladas desde su creación, las métricas de las redes sociales, el funcionamiento y rendimiento de sitio web, en conjunto con los resultados de la encuesta realizada a los representantes miembros de la Red. Se reflexiona sobre el proceso de innovación en materia comunicacional como resultado de la sinergia. Se hace hincapié en la sinergia¹, entendiendo la misma como proceso, siempre fluido y situacional, la cual se manifiesta en el ámbito del trabajo en equipo cuando los miembros comparten una dirección común creando una sensación de comunidad y apoyo mutuo.

ACCIONES COMUNICACIONALES

Para presentar las acciones comunicacionales que habilitaron distintos tipos de vinculación entre los socios y la audiencia, principalmente constituida por integrantes del ámbito académico y empresarial, se diseñó una línea temporal que permita visualizar por año la categorización de las acciones: los cursos de posgrado, los eventos organizados, los proyectos gestionados, los webinarios realizados, las vinculaciones alcanzadas y las estancias de intercambio promovidas. Se incluyeron a su vez aquellas actividades en desarrollo o proyectadas para el 2023 (Fig. N°2).

Es importante destacar que, desde sus inicios, la Red se puso como objetivo explorar la virtualidad con el fin de poner a disposición todas aquellas acciones que se realizaran, sobre todo las referidas a capacitaciones y formación para garantizar el acceso gratuito e ilimitado. De esta manera, la apertura de [Youtube](#) y del blog de [Wordpress](#) junto a la plataforma de reunión virtual Zoom, constituyeron los principales reservorios y espacios del trabajo comunicacional. Sin embargo, y en el contexto de la pandemia ocurrida entre el 2020 y el 2021, la exploración se intensificó permitiendo por un lado el desarrollo del Encuentro Iberoamericano de Redes de Biomasa y Bioenergía (IBERO-REDES): “Camino a la sustentabilidad energética” (13, 14 y 15 de octubre 2021), que se destaca por haber sido realizado completamente en un entorno virtual, mediante la Plataforma 3D Virbela, donde cada

¹ Según la RAE, la sinergia se define como “la acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales”.

participante se desarrolló en las conferencias, exposición de poster y reuniones interinstitucionales mediante un avatar personal (Fig.3).



Fig. 2 Línea del tiempo de las principales acciones realizadas y proyectadas de la Red ReBiBiR. 2019-2023. Elaboración propia

Por otro lado, y a partir de la sugerencia de un miembro socio de Cuba ante las dificultades atravesadas para el cursado de un posgrado por plataforma Zoom, se comenzó a su vez a transmitir de manera simultánea (en vivo) los webinarios, encuentros y cursos de posgrados en la plataforma YouTube, logrando así una mayor cantidad de audiencia. El link generado a partir de la transmisión en vivo de estas actividades fue compartido en el conjunto de redes sociales que se fueron habilitando y

manteniendo permanente actualizadas a lo largo del tiempo (Facebook, LinkedIn, Instagram, Twitter, WhatsApp).



Fig. 3 Encuentro Iberoamericano de Redes de Biomasa y Bioenergía (IBERO-REDES): “Camino a la sustentabilidad

La transformación de la concepción del tiempo y el espacio debido a los ecosistemas digitales, entendidos como el conjunto de plataformas, aplicaciones, dispositivos y servicios interconectados que operan en línea y que facilitan la interacción, la comunicación y la transacción de información entre personas, empresas y organizaciones, es un fenómeno que ha ocurrido con el avance y la adopción generalizada de la tecnología digital en nuestras vidas diarias (Llorca Abad,2005).La comunicación a través de estos ecosistemas digitales da lugar a la formación de diversas comunidades virtuales, trascendiendo las limitaciones físicas y permitiendo la interacción tanto en tiempo real como en momentos diferidos de la imagen. Este fenómeno respalda la noción de la Sociedad del Conocimiento, en la cual el conocimiento se convierte en el elemento de producción más significativo. Según Manuel Castells, sociólogo y teórico de la comunicación, en su obra “La Sociedad Red” (1996), las estructuras y procesos sociales se encuentran profundamente influenciados por operaciones basadas en el conocimiento, lo que ha redefinido la forma en que interactuamos, trabajamos y generamos valor en la sociedad actual. (Castells,1996). Desde esta comprensión, se entiende que las acciones comunicacionales encaradas desde las Red buscaron garantizar y poner en juego todos aquellos conocimientos que surgieran de la sinergia grupal, entendiendo que la misma fue forjándose con el transcurso de las interacciones logradas cambiándose y transformándose.

ANÁLISIS DEL USO DE TICS²

A) Sobre las principales plataformas

A continuación, se expondrán las métricas de las principales redes sociales y portales web, considerando las diferentes formas en las que se presenta cada una y aquellos aspectos que permiten autoevaluar el funcionamiento y reflexionar sobre el proceso de generación y accesibilidad del contenido. Las métricas de redes y páginas web son indicadores que se utilizan para medir el rendimiento y la eficiencia de una red o un sitio web.

En particular, el blog de [WordPress](#) de la Red se creó en el 2019, a partir del diagnóstico inicial del [espacio virtual](#) otorgado por el CYTED. Si bien se priorizó mantener ambos actualizados, se consideró que se necesitaba un lugar con mayor flexibilidad que permitiese garantizar una identidad propia y consolidar un espacio de repositorio más amigable con el usuario (Fig.4).

En el detalle histórico del blog de WordPress, se observa que, durante los cinco años de gestión de la página, se recibieron un total de 15.239 visitas, siendo el 2021 el año con mayor concurrencia

² Tecnologías de la información y la comunicación.

considerando en estas estadísticas que el reporte del año 2023 es hasta el 04 de agosto (Fig.5). Los días con mayor frecuencia de visitas son los martes a las 15:00 Hs (Zona horaria Argentina) (Fig.6).



Fig. 4 Exposición de páginas web Red ReBiBiR. Fuente: propia

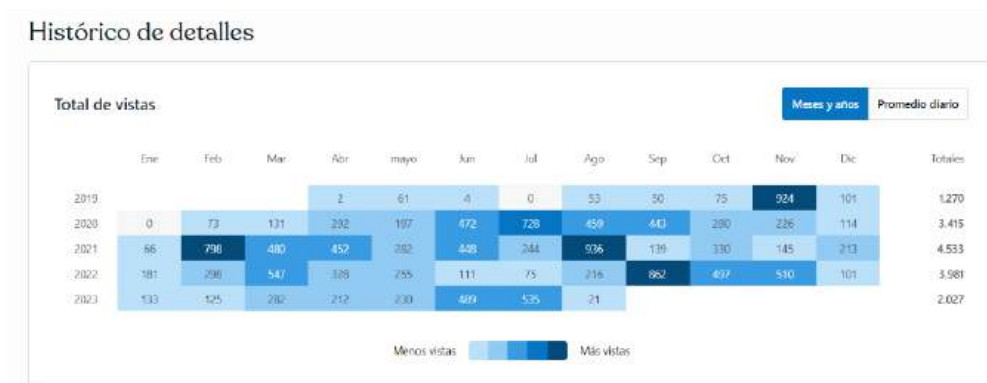


Fig. 5 Detalle histórico de visitas por año de sitio <https://redrebibir.wordpress.com/>. Fuente: propia

Lo más destacado



Fig. 6 Estadísticas totales del sitio <https://redrebibir.wordpress.com/> Fuente: propia

Además, se puede apreciar que las secciones más leídas son: la portada, los cursos de posgrado, las alianzas estratégicas, espacios de participación, encuentros y socios. Los lugares desde los que se accedió al sitio con mayor frecuencia son: motores de búsquedas (Google, Bing, etc.), Facebook, el sitio CyTED, LinkedIn, Twitter, Instagram y por email (Fig.7).

Las visitas son mayormente registradas desde IPs ubicadas en Argentina, México, España, Estados Unidos, Colombia, Brasil, Panamá, Perú, Chile y Ecuador (Fig.8). Se resalta en está referencia el hecho de que las visitas no se restringen únicamente a países miembros.

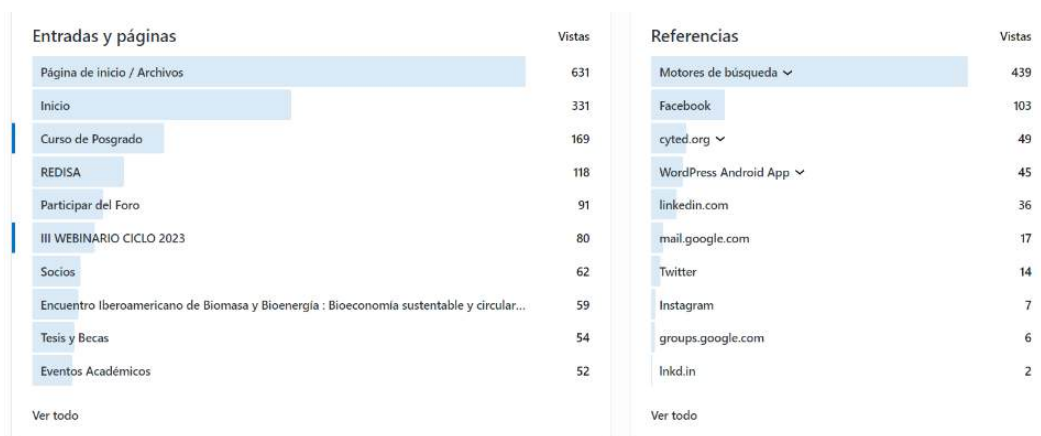


Fig. 7 Entradas y Referencias del sitio <https://redrebibir.wordpress.com/>. Fuente: propia

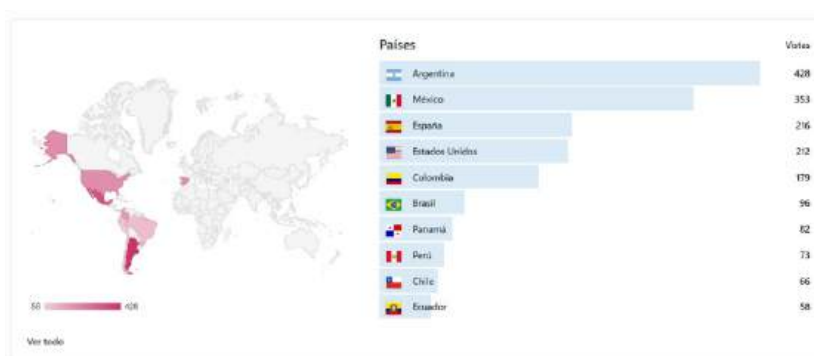


Fig. 8 Referencia geográfica de las visitas del sitio <https://redrebibir.wordpress.com/>. Fuente: propia

B) Sobre las herramientas de análisis de plataformas web

Se presentan las evaluaciones de diferentes herramientas de análisis de confiabilidad de sitios web, que fueron monitoreándose en un esfuerzo de mejora continua a lo largo de los años: a) [Nibbler](#): permite evaluar accesibilidad, experiencia de usuario, marketing y tecnologías; b) [Hubspot grader](#): permite evaluar rendimiento, optimización móvil, optimización SEO y seguridad del sitio web; c) [Woorank](#): permite evaluar SEO, móvil, usabilidad, tecnologías, errores de rastreo, redes sociales, presencia local, visitantes.

El Reporte Nibbler consultado en el 2023 evalúa un resultado global de funcionamiento del portal wordpress de la Red ReBiBiR de un 9/10, lo que indica un crecimiento desde los resultados obtenidos en el 2022 que otorgaba 8.4/10 que ya indicaban una mejora desde los 7.4/10 medidos en el 2019.

Por su parte el reporte Hubspot Grader otorgaba un puntaje de 74/100 en agosto 2022 y en agosto del 2023 se puede observar un crecimiento de 5 puntos (79/100). Por último, en la plataforma Woorank el puntaje en el 2022 era de 64/100 marcando un leve crecimiento con respecto al 2020 donde se obtuvo 58/100 y en agosto 2023 registra una mejora reportando 72/100 (Fig.9).

Las mejoras alcanzadas en el blog se deben a las modificaciones estructurales en un principio, donde se ordenaron las secciones por páginas diferenciales, permitiendo de esta manera que cada una se encuentre más descomprimida y por ende sea más liviana para asegurar un menor tiempo de carga de datos. En función de esto, se decidió usar más links externos que realizar cargas directas de contenido, por lo

tanto, los videos se comparten en el blog mediante link de enlace de YouTube y los formularios se enlazan al servicio de almacenamiento en nube: Driver.



Fig. 9 Reporte Plataformas de evaluación Nibbler, Grader, WooRank. Donde: a la izquierda se muestran los reportes para agosto del año 2022 y a la derecha para agosto del 2023. Fuente: propia

Por otra parte, se diseñó y configuró el blog pensando en su uso en diferentes dispositivos, para lo que se tomó en cuenta la plantilla de elección, los márgenes, los espacios centrados y los recursos, priorizando los visuales, textuales, y botones de enlace. Además, se utilizaron encabezados definidos, lo que es un factor de análisis y lo que permite a los visitantes y motores de búsqueda resumir el contenido de las páginas web rápidamente. Se puede apreciar la siguiente “nube de palabra” (Fig.10), resumida por Nibbler en el análisis de las entradas en el motor de búsqueda:



Fig. 10 "nube de palabras" referidas a las entradas referidas al sitio redreibir.wordpress.com en los motores de búsqueda. Generación de análisis de la plataforma Nibbler. Obtenido el 8 de agosto del 2023. Fuente propia

El desafío final en relación a este espacio digital, en el marco de la finalización del trayecto de la Red ReBiBiR como parte del CYTED, consiste en actualizar, enlazar y reordenar las secciones de manera tal de constituir un repositorio de contenidos propio que contribuyan a la promoción de la biomasa y la bioenergía en Iberoamérica, quedando así a disposición todo lo generado a partir del trabajo colaborativo, garantizando el acceso a la información y contribuyendo a conseguir los objetivos propuestos que unieron en relación a este interés en común a cada uno de los miembros de la Red.

C) Sobre el empleo de redes sociales

C.1) Youtube: @RedRebibir

El canal de [YouTube](#) fue inaugurado en el 2019 junto al primer Ciclo de Webinars. Todos los encuentros virtuales vinculados a los cursos de posgrados, seminarios, conferencias, reuniones entre socios y eventos, así como materiales generados por participantes a instancias de encuentros anuales u otros, se encuentran en este espacio virtual y desde aquí se comparten por las otras redes sociales. En el 2021 se comenzaron a transmitir en vivo estos encuentros.

Las estadísticas presentadas por la plataforma (Fig.11) indican que hay 68 videos subidos en total, 18 transmisiones en vivos, un short (video de reducida duración que circula en Youtube). El canal cuenta con 277 suscriptores, de los cuales 57 realizaron su suscripción mientras observaban un video, 34 a partir de los vivos y los restantes quienes son a su vez la mayoría, mediante otras opciones. La mayor cantidad de visitas se registra en los videos (5754 vistas), seguido de los vivos (1340) y el short (59).

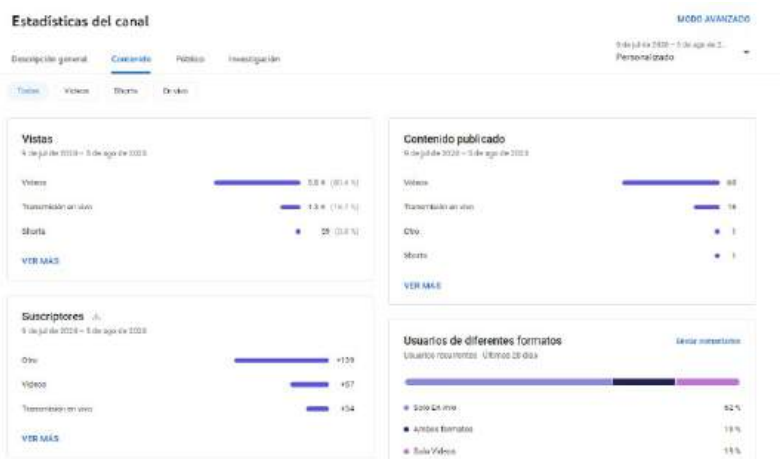


Fig. 11 Estadísticas brindadas por el Canal de YouTube @redrebibir. Obtenido en agosto del 2023. Fuente propia

Estos números se pueden comparar con aquellos registrados en el primer cuatrimestre del 2022, que indicaban un total 4.790 de vistas y una cantidad de impresiones (cantidad de veces que las miniaturas de tus videos se mostraron a los espectadores en la plataforma YouTube) de 54.413, siendo las actuales 98.009 (Fig.12 - a). La ubicación geográfica de quienes visitaron el sitio incluye: Argentina, Colombia, México, España, Perú, Panamá, Paraguay, Honduras, Cuba, Costa Rica, Estados Unidos, Perú y Chile (Fig.12 – b). Suman el número de visitas, entre todos los contenidos, un total de 7,170 con un tiempo de reproducción de 1.295 horas desde el 2019 al 2023.



Fig. 12. a) Estadísticas de impresiones canal de YouTube @redrebibir. b) Estadísticas de distribución geográfica y total de visitas con promedio de horas. Fuente propia

Según los datos de la audiencia brindados por la plataforma, la mayoría se percibe de forma masculina representado por un 60,5% y 39,5% femenino. La edad promedio es de entre 35 y 44 años, representado por un 51,5%, seguido por una generación menor (25-34 años) con un 35,5%, y entre los 55 y 65 años representado en un 13%.

C.2) Otras Plataformas

- **Facebook:** Actualmente se registran 347 amigos, 39 amigos más que en el 2022 donde el número era de 308 amigos. La Red posee su propio usuario de Facebook a través de Gmail. A la fecha cuenta con más de 170 publicaciones en total. El contenido se enlaza a la página de Wordpress y al canal de YouTube.
- **LinkedIn:** La adhesión a esta red comienza el 20 de abril de 2020. A la fecha tiene 671 contactos y 170 publicaciones que oscilan entre las 1900 y 1100 visualizaciones en un lapso de un año. Los seguidores son mayoritariamente de España, seguido de Colombia y Brasil. Las áreas de trabajo del público son: Fabricación de semiconductores de energías renovables (18,3 %), Servicios medioambientales (11 %), Servicios de investigación (8,9 %), Enseñanza superior (8,7 %), Petróleo y gas (5,7 %) (Fig.13).
- **Foro Google Groups:** es de carácter libre y gratuito y abierto a la comunidad, comienza a funcionar el 11 de agosto de 2020 y cuenta con 300 participantes. La convocatoria se hizo por las redes sociales.
- **Twitter:** A partir de la autoevaluación presentada en el 2020 se creó el canal de Twitter @rebibir el cual tiene actualmente 54 seguidores. Según las analíticas de la plataforma, ha tenido un total de 3.624 impresiones desde su creación con 28 publicaciones en total.
- **Instagram:** Se adoptó en el año 2021, actualmente tiene 116 seguidores, 45 publicaciones. En los últimos noventa días a partir del 6 de agosto del 2023, las impresiones han sido de 751 cuentas, de las cuales se pudieron fidelizar (sumar seguidores) en un 12,8%, aumentando los seguidores y por lo tanto conformando un público orgánico de la cuenta.



Fig. 133 Estadísticas de los sectores que consultan LinkedIn de la Red Rebibir. Obtenido en agosto del 2023. Fuente propia

D) Evolución temporal de los canales de comunicación

A continuación, se presentan los indicadores de cada uno de los canales mencionados desde el año 2019 al 2023, considerando los usuarios, seguidores, visitas, e inscriptos como formas de participación y construcción del entorno digital. Esto permite observar un crecimiento sostenido durante los años de gestión, reafirmando la idea de que el proceso de establecimiento, legitimidad y confianza con el público es un trabajo continuo y capaz de adaptarse a las necesidades y herramientas que el entorno ofrece (Tabla N°2).

Tabla 1. Evolución histórica del impacto de la Red en la comunidad, medido a través de los canales comunicacionales abiertos en el periodo - 2019-2022

Indicadores	Canal	Fecha de creación	Unidad	Año				
				2019	2020	2021	2022	1 Trim. 2023
METRÍCAS DE REDES	Wordpress	20/04/2019	Visitas	1283	3415	3983	3982	2038
	Youtube	01/05/2019	Suscriptores	12	36	137	218	275
	Facebook	01/06/2019	Amigos	21	109	206	308	347
	LinkdIn	20/04/2020	Seguidores	1	304	467	593	671
	Twitter	20/09/2020	Seguidores	-	4	25	35	54
	Instagram	01/07/2021	Seguidores	-	-	50	86	116
FORMULARIO	Webinarios		Inscriptos	35	679	458	389	418

REFLEXIONES DESDE EL INTERIOR DE LA RED DE SU TRAYECTO DE VIDA Y EN PARTICULAR, SU ESTRATEGIA COMUNICACIONAL

A fin de conocer la percepción de los propios socios en relación a la estrategia comunicacional y el impacto logrado en la región, se realizó una consulta hacia el interior de la Red (Javi, et al, 2021) logrando la respuesta de 22 socios. Esta información permitió identificar ejes de trabajo futuro, como así también puso de relieve el carácter diferencial de los grupos (centros de I+D; empresas; sector público), que requerirá definir estrategias específicas para los próximos años.

En cuanto al cumplimiento del objetivo general de la Red, el 95,4% de los socios considera que las estrategias seleccionadas han permitido alcanzar correctamente el objetivo propuesto (la diferencia denota el ingreso de socios recientes que aún no contaban con los elementos necesarios para emitir su opinión al respecto). Asimismo, los socios tienen una vivencia positiva de su pertenencia a la Red y han expresado comentarios altamente gratificantes en su complacencia de las actividades y el funcionamiento de la Red durante todo su ciclo de vida (Manrique et al., 2022).

Las actividades de ReBiBiR (T) que resultaron de mayor importancia para los socios se destacan: webinarios de ciclos regulares y propuestos desde los grupos (el 72,2% coincidió en destacar su importancia); libros publicados por la Red (69,2%); encuentros y eventos virtuales por su amplia llegada territorial (54,5%); cursos de posgrado (50%); los encuentros presenciales -aunque durante casi dos años consecutivos no pudieron concretarse por la pandemia- (45,5%); participación en eventos como Socios de ReBiBiR (T) (36,4%); las vinculaciones con otras redes temáticas (31,8%); la difusión de ofertas y oportunidades (22,7%); y en menor grado se colocan los proyectos conjuntos, los proyectos con otras redes, el aval de Red en instancias académicas, y estancias de intercambios financiadas por la Red. Esta valoración pudo lograrse dado que se solicitó colocar orden de importancia, pero en ningún caso se entiende que las actividades no fueran valiosas en sí mismas, ya que fueron consensuadas hacia el interior de la Red.

ReBiBiR (T) viene trabajando la posibilidad de mantener la Red funcionando, una vez que el financiamiento provisto por el programa CYTED cumpla su periodo de ejecución. En ese sentido, se propuso un memorándum de colaboración institucional que el 40,9% de los socios lo considera que será un instrumento válido para mantener el funcionamiento de la Red. Cabe destacar que el 100% de los socios manifiesta estar dispuesto a seguir trabajando después de que se concluya el proyecto. Y en este sentido, se trabaja en la postulación de una nueva Red en el mismo marco de financiamiento

En cuanto a la apreciación del aspecto comunicacional y el uso de las herramientas TICs el 100% de los socios valora como de alta importancia la tarea desarrollada. El 81,8% de los socios manifiesta la importancia del uso de WhatsApp para la organización y comunicaciones inmediatas dentro de la Red. Como estrategias hacia afuera de la Red, el 77,3% valora las comunicaciones mediante correo electrónico (se habilitó específicamente una casilla propia redrebibir@gmail.com manejada por todos los socios); el 40,9 % valora Facebook; el 36,4% la página web oficial de ReBiBiR (T) de CYTED; el 36,4% se inclina por LinkedIn; el 18,2% el canal de YouTube, y en menor medida se expresa la utilización del blog, Instagram y Twitter como herramientas de importancia. Posiblemente estas últimas herramientas sean las menos conocidas para socios que se encuentran en grupos etarios de más de 50 años, y a esto debe sumarse, que fueron las últimas habilitadas desde el equipo Coordinador.

CONCLUSIONES

La autoevaluación del proceso sinérgico dentro de la Red ReBiBiR (T) ilustra un progreso positivo y continuo en sus esfuerzos comunicativos y en la forja de una comunidad virtual que abraza el aprovechamiento eficiente de la biomasa y la energía renovable rural en la región iberoamericana. La adaptación al entorno digital y la diversificación de plataformas han ampliado su visibilidad y la interacción con su audiencia, como también ha garantizado su funcionamiento sobre todo durante la pandemia.

El análisis de métricas en redes sociales y el sitio web revela un crecimiento en el alcance y la participación de la audiencia, indicando una estrategia comunicativa eficaz relacionada con la sistematicidad de la carga de contenido y la promoción de las actividades que la Red ha desarrollado en función a la generación de espacios de participación e intercambio de saberes entre los grupos y la audiencia interesada en el tema. Sin embargo, se reconoce que debe mantenerse adaptable a las nuevas tendencias. Se destaca la importancia de su presencia en plataformas como YouTube y LinkedIn, que

han resultado particularmente relevantes para la disseminación de conocimientos y la formación de alianzas con sectores afines.

Los propios miembros de la Red expresan una valoración positiva en relación al logro de su objetivo central y reconocen que se ha logrado en un espacio de trabajo ameno, cálido y colaborativo. Este objetivo se centra en promover alternativas de uso y manejo eficiente de la biomasa y su transformación en energía, con el propósito de contribuir a comunidades sostenibles y adaptables ante el cambio climático. En esta perspectiva, se subraya la función esencial desempeñada por las redes sociales y los entornos en línea. La utilización de estas plataformas facilitó el intercambio de conocimientos, la comunicación entre los miembros y la comunidad y la promoción de trabajos conjuntos y avances científicos, alineados con los propósitos de la Red. La interconexión proporcionada por estas herramientas modernas emerge como un elemento vital para la sinergia y la colaboración, propulsores del éxito de la Red ReBiBiR (T) en su misión de fomentar el desarrollo energético sostenible.

Se analiza que más allá del número creciente de participaciones (“cantidad”), el resultado de alto valor de dichas participaciones (es decir, “su calidad” medida en el impacto de las mismas) puede verse en: las publicaciones de Actas de reuniones y Cuadernos de trabajo logrados a partir de eventos territoriales de acceso libre con alta productividad; la publicación de libros propios, abiertos a la participación de no-socios de la comunidad iberoamericana, pero que obligaba a establecer contactos y al desarrollo conjunto de los capítulos, con algún socio activo de la Red; la reorientación y adecuación del trabajo de la Red a temáticas específicas del territorio, identificadas en los espacios de diálogo e intercambio abiertos entre socios y la comunidad iberoamericana (mediante los webinarios, los eventos virtuales, el foro virtual, los talleres y reuniones, entre otros) que luego dieron lugar a proyectos conjuntos, dirección conjunta de tesis de grado y posgrado, diseño e impartición de capacitaciones específicas y cursos de posgrado con alto nivel de participación.

Las actividades y productos que se mencionan son los logrados como nuevos productos creativos del trabajo conjunto de los socios y en la articulación con la sociedad a partir de la Red, a lo cual deben sumarse las actividades individuales que los socios han seguido desarrollando como parte de su tarea cotidiana de investigación, docencia y extensión. En el caso de ReBiBiR-T, no se ha repetido ninguna actividad ni contenido a lo largo de los 5 (cinco) años en las actividades desarrolladas, sino que fueron diseñados e impartidos ad hoc, en función de los objetivos de la Red y su flexible adecuación al medio, aunque sin olvidar sus metas principales.

La Red ReBiBiR (T) concluye satisfactoriamente un ciclo de vida completo, con una productividad que fue mucho más allá de lo acordado en su planificación original, y que fue posible gracias a la implementación de una estrategia de trabajo flexible, adaptable, abierta al diálogo, inclusiva, comprometida y de alto nivel de esfuerzo. El impacto logrado por ReBiBiR (T) en la región no ha terminado, ya que, con un soporte fuerte de tiempo y energía invertidos en su estrategia comunicacional, se espera que dicho impacto continúe multiplicándose exponencialmente a futuro, ya que todos los productos logrados han quedado cristalizados en sus canales y plataformas, y son de acceso libre, gratuito, irrestricto e ilimitado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), por el financiamiento otorgado a la Red ReBiBiR (T), la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural.

Celebramos la participación de todos los socios que integran la Red ReBiBiR y agradecemos la confianza, el entusiasmo y la predisposición para el trabajo conjunto de manera interdisciplinaria e interinstitucional. Gracias a cada miembro de la comunidad iberoamericana que se ha ido sumado a lo largo de estos años de vida con su valiosa participación.

REFERENCIAS

- Aguilera, J. M. y Parada-Arias, E. (1992). CYTED-D project on intermediate moisture foods and combined methods technology. *Food Research International* 25 (1992) 159-165.
- Castells, M. (1996). *La Era de la Información: Economía, Sociedad y Cultura*. Vol. 1: La Sociedad Red. Alianza Editorial.

- Manrique, S. M. (2019). Identidad de los grupos de la Red. Primer Entregable. Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). <http://www.cyted.org/es/biblioteca-proyecto/10590>.
- Manrique, S.M.; Javi, V.; Villafañe, F.; Binda, C.; Salvo, A., Ontiveros, S.; Balderrama, B.; Caso, R.; Honorato, M. (2019). Red Internacional en biomasa y bioenergía: Resultados, aprendizajes y propuesta de evaluación. AVERMA 23: 11-23. ISSN 2314-1433.
- Javi V.; Manrique S.M.; Binda C.; Villafañe F.; Salvo A., Martín N, Ontiveros S. (2020). Actualización, ajustes y perspectivas de la evaluación de la red temática REBIBIR (T). AVERMA 24: 244-255. ISSN 2314-1433.
- Javi V, Binda C y Manrique S (2021). Encuesta de autoevaluación a los socios de la Red. Documento de trabajo interno de ReBiBiR-T. Inédito. 15 páginas.
- Llorca Abad, G (2005) Comunicación interpersonal y comunicación de masas en internet. emisor y receptor en el entorno virtual el ecosistema digital. En Modelos de comunicación, nuevos medios y público en Internet. López García, G (ed.). Valencia. Servei de Publicacions de la Universitat de València. ISBN 84-370-6302-7
- Manrique, S.M. (2021). “Alianzas regionales en biomasa y bioenergía: una estrategia hacia la sustentabilidad energética y territorial”. En: Publicaciones Científico Técnicas y de Difusión de Proyectos aceptadas en el Marco del Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 17 edición. 31 de mayo al 03 de junio de 2021. Trabajo completo. Madrid, España. ISBN 978-84-09-31739-4. 23 pág.
- Manrique SM, Binda C, Javi V, Salvo A, Balderrama B y Villafañe F (2022). Análisis de impacto, reflexiones y perspectivas de un proyecto de sinergia y gobernanza para la transición energética. 16a edición del Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 21 al 24 de noviembre del 2022. Recopilación de Publicaciones Científico Técnicas y de Difusión de Proyectos aceptadas en el Marco del Congreso Nacional del Medio Ambiente. Agencia Española. ISBN 978-84-09-46920-8. Madrid, España. 23 pág..
- Parada-Arias, E. (1995). CYTED - The Iberoamerican Cooperative Research Program in Food Technology. Food Research International 28 (4): 343-346. Elsevier Science Ltd.
- Patlán Pérez, J. y Martínez Torres, E. (2017). Evaluación de la imagen organizacional universitaria en una institución de educación superior. Contaduría y administración 62 (1). Versión impresa: ISSN 0186-1042. <https://10.1016/j.cya.2016.07.002>
- Sanderink, L. y Nasiritousi, N (2020). How institutional interactions can strengthen effectiveness: The case of multi-stakeholder partnerships for renewable energy. Energy Policy 141 - 111447. Elsevier Science Ltd.102

REFLECTIONS ON THE SYNERGETIC JOURNEY OF THE THEMATIC NETWORK REBIBIR (T) AIMED AT PROMOTING BIOMASS AND RURAL BIOENERGY TECHNOLOGY IN IBERO-AMERICA

Abstract: After approximately 5 years (2019-2023) of activity of the ReBiBiR Network, a reflexion about the communicational actions developed as part of the strategies was made, quantifying and analysing its performance as a proxy of the synergic work developed. A temporary line made by years show the categorization of actions: postgraduate courses, organized events, managed projects, conducted webinars, bindings and promoted stays. Social medias temporal metrics are evaluated: WordPress, Facebook, LinkedIn, Instagram, Twitter. An analyses of web tools it's also made: Reporte Nibbler, Hubspot grader, Woorank, Google Groups forum. For the other hand, the results obtained from a survey conducted to the institutional referents member of the Network are shared. The survey allowed showing the perceptions about the objectives, communication and projections of the Network in order to sustain the synergic accomplished. A positive and sustained developed and the conformation of a virtual community committed with the efficient use of biomass and rural bioenergy in Iberoamerica is evidenced. As a conclusion, the digital environment and use of the platforms are allowed visibility, regional participation and sustained growth of reach and impact of the network.

Keywords: social network analytics, self-assessment, communicational strategies, thematic network, biomass technologies.

SENTIDOS EN TORNO A LA DIMENSIÓN ENERGÉTICA EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HÁBITAT EN TERRITORIOS INDÍGENAS EN LA PROVINCIA DE SALTA

Facundo D.F. Gonzalez¹, Juan F. Picabea², Pablo A. Duran¹

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO)- Universidad Nacional de Salta (UNSa). Avenida Bolivia N°5150 (Salta- Argentina).

Teléfono: +54387-5809428, E-mail: facundoinenco@gmail.com

²Instituto de Estudios Sociales sobre la Ciencia y la Tecnología (IESCT)- Universidad Nacional de Quilmes (UNQ). Roque Sáenz Peña N°532 (Bernal- Argentina).

RESUMEN: El trabajo presenta un análisis sociológico del proyecto de voluntariado universitario denominado “La Misión-Rivadavia: diagnóstico e intervención socio técnica para la mejora del hábitat de comunidades originarias Wichí en el Chaco Salteño” (Provincia de Salta). Se propuso estudiar las condiciones de hábitat de la comunidad *Wichí* de El Cocal y consistió en la transferencia de cocinas a base de biomasa en una escuela bilingüe de la zona. El proyecto fue llevado adelante por el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional y la Asociación Civil *Amtena*, financiado parcialmente con fondos del Programa “Compromiso Social Universitario” de la Secretaría de Políticas Universitarias de la Nación durante los años 2017 y 2020. Los resultados identificaron rasgos en la producción de monoculturas del saber y del rigor y la emergencia de ecologías que des racionalizan la producción de hábitat en un territorio que resiste a los regímenes del Modelo Civilizatorio Moderno Colonial en sus facetas de colonialidad/colonialismo y de capitalismo. Al mismo tiempo emergen aprendizajes “*Habilitadores de Hábitat*” que permiten revisar la (re) producción de sentidos de hábitat en actores culturalmente diferentes a los occidentales, puntualización en la dimensión energética.

PALABRAS CLAVE: Hábitat, Wichís, Energía.

INTRODUCCIÓN

Las formas lineales de regulación social y la anulación de la imaginación como instancia de producción de formas de ser y de estar en el mundo debilitan y permean el modelo civilizatorio moderno colonial. En ese marco, cómo se vive y en qué condiciones, son interrogantes que permiten reflexionar sobre la reinstalación de utopías latinoamericanistas, contrahegemónicas y situadas. No hablamos, sin embargo, de utopías originarias, pues creemos que la historia del vínculo colonial es una característica en la construcción del proyecto latinoamericano decolonial enclavado en el Sur Global, apoyado en la propuesta de Epistemología del Sur, como un *Pensamiento Posabisal* (Santos, 2018).

En artículos anteriores, se ha venido discutiendo sobre los enfoques de producción de políticas de hábitat y energía cuando estos incluyen actores culturalmente diferentes y la pertinencia de influir perspectivas no occidentales (Gonzalez, Rodriguez, 2020; Gonzalez, 2021a, Gonzalez, 2021b). Desde este marco conceptual se dispuso el análisis parcial del proyecto objeto de este artículo (Gonzalez, Rodríguez y Hessling, 2020, Gonzalez, 2020), donde se consideraron los avances de la intervención de actores de la Universidad Nacional de Salta junto a comunidades indígenas que demandaban acceso a energía para mejorar sus condiciones de hábitat.

Así, el Proyecto de Compromiso Social Universitario denominado “La Misión-Rivadavia: diagnóstico e intervención socio técnica para la mejora del hábitat de comunidades originarias *Wichí* en el Chaco Salteño” se diseñó durante el segundo semestre del año 2016 y se presentó a la convocatoria de la Secretaría de Políticas Universitarias de ese año, extendiéndose su ejecución entre los años 2017 y 2020. La formulación surgió producto del contacto de miembros del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) que desarrollaron proyectos de destiladores de aguas solares para las

comunidades indígenas y criollas en el territorio del Chaco salteño entre 2010 y 2015. Este vínculo, que permitió que el INENCO fuera reconocido como una institución de ciencia y desarrollo tecnológico en esa región, y sirvió para que el cacique *Wichí* de la comunidad La Misión contactara a INENCO. Joaquín, militante social y sociólogo radicado en la zona, desplegó la estrategia de vinculación con el instituto. Joaquín transmitió que la comunidad deseaba contar con electricidad en sus viviendas durante la noche y que la cocina de la escuela bilingüe demandaba más leña de la que podían costear para la cocción de las cuatro comidas de los niños que allí asisten (Gonzalez, Rodríguez y Hessling, 2020).

El INENCO se mostró interesado en la posibilidad de trabajar con esta comunidad en particular y delegó en su equipo la búsqueda de potenciales líneas de financiamiento. Es así como en septiembre de 2016, la comunidad y el INENCO, postularon a la convocatoria Proyecto de Compromiso Social Universitario proponiendo un diagnóstico e intervención sociotécnica (Gonzalez, 2019) que permitiera mejorar condiciones del hábitat de la comunidad.

El proyecto fue formulado por miembros del INENCO debido a la premura -cierre de la convocatoria-, las distancias y la brevedad del formulario para la postulación. Como los fondos máximos posibles a otorgar eran \$40.000, por una cuestión de costos se decidió -en acuerdo con el Cacique de La Misión- que se comprarían como bienes transferibles a la comunidad tres cocinas a base de Biomasa para la escuela de El Cocal con el objetivo de hacer eficiente el uso de la chamiza que rodea a la comunidad creando biomasa para producir energía.



Figura N°1: Prototipos de cocinas a base de biomasa presentadas a la comunidad. Fuente: propia.

METODOLOGÍA Y ENFOQUE CONCEPTUAL

A partir del empleo de una actitud cualitativa (Gonzalez, 2020) se buscó comprender los escenarios de intervención en estudio a partir de las percepciones de los actores que la conforman, es decir, conceptualizar a partir de los comportamientos, actitudes, conocimientos y valores de quienes participan en el estudio (Gonzalez, 2021a), en interacción con las propias significaciones (Yuni y Urbano, 2016). El interés se centró en explorar, describir y comprender los fenómenos en estudio para luego fundar perspectivas teóricas que no revisten pretensiones de generalización, sino que –justamente- admiten el carácter situado y local de las conclusiones a las que se arriba (Hernández Sampieri, 2010).

Cuando se dice que el análisis se realiza a partir de la voz de los actores en interacción con las propias significaciones, referimos a dos cuestiones centrales de la perspectiva metodológica en la que se sustenta este artículo. Por un lado, la centralidad otorgada a la experiencia de los propios actores y, por otro, la renuncia a la pretensión de neutralidad, en tanto una realidad “objetiva” es imposible de ser capturada por los actores. Esta decisión se apoya en la idea de Intelectual de Retaguardia (Santos, 2014), en sintonía con quienes descencianlizan la tarea del intelectual a partir de la vanguardia. Por el contrario, Santos (2014) propone el rol del intelectual como un facilitador, recuperando experiencias, compartiendo, y comunicando(se) con términos científicos sin terminología científica, buscando inteligibilidad:

Así, cada investigador habla desde una comunidad interpretativa particular, que le es propia y que configura, a su manera, los componentes culturales y genéricos del acto de investigación (Denzin y Lincoln, 2005, p. 80). Esto no quiere decir que el artículo consista en una interpretación subjetiva

personal de la experiencia, sino que se es conscientes de que el análisis que se realiza y las conclusiones a las que se llega son producto del diseño que se elaboró, los caminos elegidos y las decisiones tomadas en el proceso de investigación. Un proceso orientado desde la crítica misma a la modernidad, por ende, a la ciencia moderna que aspira a la neutralidad. Pero sí se aspira a la objetividad en términos de Santos (2014), quien considera que la objetividad se apoya en la forma de empleo de las metodologías desde la buena fe, reconociendo alcances y límites de aptitudes, actitudes y competencias.

El Modelo Civilizadorio Moderno Colonial invisibiliza aquello que no se corresponde con lo moderno, lo científico, lo occidental. La racionalidad científica occidental, posicionada desde la ignorancia arrogante, asume que nada tiene que aprender del Sur Global (Santos, 2018). Este *Pensamiento Abisal* produce una *línea abisal* que estructura el pensamiento moderno eurocéntrico y nutre la configuración de las relaciones políticas y culturales excluyentes que sostienen el sistema – mundo colonial moderno. El enfoque conceptual del trabajo parte de tres conclusiones facilitadas por Santos (2009):

1- La experiencia social en todo el mundo es mucho más amplia y variada de lo que la tradición científica y filosófica occidental conoce y considera importante.

2- “De este desperdicio se nutren las ideas que proclaman que no hay alternativa, que la historia llegó a su fin, y otras semejantes” (Santos, 2009, p. 99)

3- Para hacer visibles las experiencias, iniciativas y movimientos alternativos hay que recurrir a una ciencia social otra, que no esconda o desacredite las alternativas. Se trata de un modelo diferente de racionalidad.

La Racionalidad “universal, europea, occidental”, que sostiene el universalismo del Modelo Civilizadorio Moderno Colonial, es caracterizada por Santos como una Razón Indolente constituida por cuatro razones diferentes: la impotente (aquella que no se ejerce porque piensa que nada se puede hacer contra una necesidad concebida como exterior a ella misma), la arrogante (no siente la necesidad de ejercerse porque considera incondicionalmente libre, incluso de demostrar su libertad), metonímica (la única forma de racionalidad, no busca descubrir otras formas de racionalidad), y proléptica (que no tiende a juzgar el futuro, porque considera que lo sabe todo de él, y lo concibe como una superación lineal, automática e infinita del presente) (Santos, 2009).

Así, la razón metonímica propone un modo único de existir, produciendo la no existencia de lo que no cabe en su totalidad y en su tiempo lineal. Santos (2002) reconoce cinco procesos de producción de la no existencia, unidos como diferentes lógicas de la manifestación de esta monocultura racional: 1) Monocultura del saber (las ciencias modernas como única verdad. La no existencia asume aquí la forma de ignorancia o incultura); 2) Monocultura del tiempo lineal (según la cual la historia tiene sentido y dirección únicos y conocidos. La no existencia se produce declarando atrasado todo lo que, según la norma temporal, es asimétrico con relación a lo que es declarado avanzado); 3) Monocultura de la naturalización de la diferencia (lógica de la clasificación social que consiste en la distribución de las poblaciones por categorías, como la racial o sexual, que naturalizan jerarquías); 4) Lógica de escala dominante (la escala adoptada como primordial determina la irrelevancia de todas las otras escalas posibles. La no existencia es producida bajo la forma de lo particular (versus el universalismo abstracto) y lo local (versus la globalización neoliberal); 5) Monocultura de los criterios de productividad capitalista (en esta lógica el crecimiento económico es un objetivo racional incuestionable al igual que la idea de maximización de la productividad. La no existencia es producida bajo la forma de improductivo).

La producción de estas formas de no existencia, de ausencias, “desemboca en la sustracción del mundo y en la contracción del presente y, por consiguiente, en el desperdicio de la experiencia.” (Santos, 2009, p.112). Y la tarea de transformar lo inexistente en existente, lo imposible en posible, lo ausente en presente requiere de la construcción de un pensamiento posabisal que se centre en los fragmentos de la experiencia social no socializados por la totalidad metonímica. A esto, Boaventura de Souza Santos (2009) denomina Sociología de las Ausencias: “La sociología de las ausencias intenta identificar el ámbito de esa sustracción y de esa contracción del mundo para que esas experiencias producidas como ausentes sean liberadas de esas relaciones de producción y, por esa vía, se tomen presentes.” (p. 112)

La Sociología de las Ausencias opera sustituyendo monoculturas por Ecologías como “(...) práctica de agregación de la diversidad a través de la promoción de interacciones sustentables entre entidades parciales y heterogéneas.” (Santos, 2009, p. 113). El autor propone, a partir de la confrontación de cada una de las lógicas de producción de monoculturas, cinco ecologías:

- 1) Ecología de los Saberes: como práctica de exploración de concepciones alternativas a la monocultura del conocimiento. Parte de un principio de incompletud a partir del presupuesto de que la experiencia humana implica más que una forma de saber y de ignorancia.
- 2) Ecología de las Temporalidades: como propuesta alternativa a la concepción lineal del tiempo de la modernidad. Propone la idea de existencia de otras temporalidades apoyadas en una sapiencia multitemporal que permita la co-presencia de otras formas de percibir el tiempo.
- 3) Ecología de los Reconocimientos: en esta ocasión el autor cuestiona la lógica de clasificación social y para eso se apoya en la colonialidad del poder señalando cómo el Modelo Civilizatorio Moderno Colonial identifica la diferencia con la desigualdad y se adosa el privilegio de determinar quién es igual y quien es inferior o diferente (consecuentemente inexistente). Esta Ecología propone reconocimientos mutuos y recíprocos.
- 4) Ecología de las Transescalas: como crítica a la lógica de monocultura de universalismo abstracto y de la escala global, Santos plantea una recuperación simultánea de aspiraciones universales ocultas y de escalas locales/globales alternativas que no resultan de la globalización hegemónica.
- 5) La Ecología de la Productividad: consiste en la recuperación y valorización de los sistemas alternativos de producción, de las organizaciones económicas populares, de las cooperativas obreras, de las empresas auto-gestionadas, de la economía solidaria, etc. que el sistema capitalista oculta o desacredita (Santos, 2009).

Las premisas programáticas propuestas por el intelectual portugués tienen por objetivo revelar la diversidad y multiplicidad de las prácticas sociales expuestas en las experiencias de cada grupo. Además, pretende habilitar un vínculo de co-existencia sin pretensiones destructivas. En este trabajo se pretende usar esta plataforma conceptual como resorte epistemológico del análisis.

IDENTIDADES EN EL TRABAJO DE CAMPO

En total, se realizaron los 12 viajes a la zona del chaco salteño en el periodo 2017- 2020. Los 6 primeros tuvieron como objetivo entablar un vínculo con la comunidad de El Cocal y acordar algunas acciones relacionadas con el interés de esta comunidad. El equipo colaboró entonces con tareas de mantenimiento de redes de agua y estructura de las viviendas, acompañó a los hombres en la búsqueda de leña y en la pesca, y asistió a las mujeres en el uso del combustible para optimizar su desempeño. A su vez, se colaboró en la formulación de propuestas¹ de la comunidad para representantes legislativos.

Estas acciones tuvieron como objetivo generar un trato de confianza que apoyara las acciones conjuntas. Muchas de las tareas domésticas y de organización de la comunidad de las que se participó forman parte de la intimidad de quienes participaron y serán reservadas, sosteniendo el lazo de respeto mutuo que se asumió.

¹ Las comunidades solicitaron colaboración y asesoramiento en el diseño de propuestas legislativas que promovieran usos racionales de los recursos naturales relacionados con necesidades energéticas. Con lo cual se elaboró colectivamente documentos que el Cacique derivó en funcionarios del Estado Provincial.

Registro de primeros viajes al Chaco salteño



Figuras 2, 3, 4 y 5 (de izquierda a derecha y de arriba abajo): Vecindario de la comunidad de El Cocal. Fuente: Proyecto El Cocal.

En los viajes 7, 8 y 9 del trabajo de campo se desarrollaron talleres para profundizar las experiencias y expectativas de hábitat de la comunidad. En este punto, la constitución de género del equipo contribuyó a facilitar diversas acciones y tareas. Por ejemplo, las mujeres de la comunidad no entablaron un vínculo de confianza y fluidez con los hombres del equipo, más si con las mujeres. Así, las mujeres del equipo coordinaron el taller destinado a mujeres mientras que los varones trabajaron con el taller de niños y hombres. Esta particularidad en el diseño y desarrollo de los talleres está relacionada a la forma de vinculación que establecen las mujeres *Wichí* con los hombres criollos, con quienes no acostumbran a relacionarse, a menos que se hayan establecido de forma permanente en el territorio.

Esta cuestión de género implica un análisis en el que no profundizaremos en este artículo, pero que resulta necesario exponer para futuras investigaciones. No obstante, parece relevante mencionar que en la comunidad existe una distribución del poder que no se asocia necesariamente a una jerarquía de género, pues las también mujeres pueden ser caciques y encabezar diferentes procesos en la organización comunitaria. No obstante, algunos hechos recientes de abusos, violaciones y acoso contra mujeres de la comunidad de La Misión por parte de criollos han hecho que la comunidad restrinja la vinculación de las mujeres con extraños. A partir de lo anterior vemos, cómo en la cultura *wichí* el patriarcado avanza y provoca situaciones de vulnerabilidad y violencia de género (Gonza, Gonzalez, Durán, 2022).

Registro de Talleres en El Cocal



Figuras 6 y 7: Desarrollo de talleres, incluyendo a los facilitadores junto al director de la Escuela y referentes *Wichí* de El Cocal. Fuente: Proyecto El Cocal.

Durante los viajes 10 y 11 se trabajó con la comunidad en la sistematización audiovisual y escrita de los viajes anteriores, y se capacitó a las personas interesadas -incluyendo docentes de la Escuela- en el uso del prototipo de cocina a base de biomasa que se compró y entregó en el viaje N° 7. Este último viaje incluyó el registro comparativo del uso de leña y/o chamiza respecto de una cocina tradicional a base de leña. Es decir, se buscó evaluar el desempeño del equipo diseñado por el INENCO en la optimización del uso del recurso con los consecuentes ahorros en los costos de obtención del recurso leña.

Registró de últimos viajes a El Cocal



Estas fotografías (8 y 9) muestran momentos compartidos entre parte del equipo del INENCO y miembros la comunidad de El Cocal: recorriendo parte del Rio Bermejo y compartiendo comidas durante los viajes. Fuente: Proyecto El Cocal.

Esta última serie de Figuras (8 y 9) se intenta reflejar el resultado de la construcción de un vínculo de confianza que emerge, no consolidado, pero sí como un principio de lazo para nuevos proyectos y procesos de producción de hábitat con la comunidad. Sería deshonesto decir que se construyó un vínculo fuerte, pues aún éramos “otros” o “parte de los criollos”, pero se estableció una relación participativa. La prueba de esta confianza deberá superar el paso del tiempo. Los referentes de la comunidad intentaron hacernos sentir cómodos y que nos familiarizáramos con aquellas prácticas y costumbres que estaban dispuestos conscientemente a compartir.

MONOCULTURA DEL SABER Y EL RIGOR

La razón metonímica (Santos, 2014) plantea una doble idea de las dicotomías y jerarquías, por lo que resulta imposible pensar por fuera de la totalidad: no hay sur sin norte, no hay mujer sin hombre ni esclavo sin amo. Pero estas dicotomías, que se presentan como relaciones de contraposición, guardan una jerarquía explícita: norte sobre sur, hombre sobre mujer y amo sobre esclavo. En este sentido, la producción de los modos hegemónicos de producción de hábitat produce no existencias, ausencias muchas veces latentes en las comunidades. Esas ausencias latentes en los modos de habitar el territorio y de producir hábitat están invisibilizadas, ocultadas, denigradas o prohibidas en el caso del pueblo *Wichí*.

La forma colonial y capitalista impuso un modo legítimo -y legal- de producir hábitat a partir del Estado y del mercado.

La colonización del pueblo *Wichí* del chaco salteño se llevó adelante en gran parte del proceso por parte del incipiente Estado argentino hasta principios del siglo XX. Las condiciones climáticas y la resistencia en la lucha del pueblo *Wichí* retardaron la colonización. No obstante, esto derivó en condiciones de terror que violaron cualquier régimen de dignidad humano acabando con la vida de quienes no cedían sus territorios y asumían la nacionalidad argentina. Niños y mujeres fueron separados de los hombres que fueron asesinados o expulsados del territorio:

“Aquí el monte nos ayudó mucho, yo sé que luchamos por qué no nos sacaran todo, pero no pudimos, mirá ahora, todo lleno de soja y sin árboles” (José, El Cocal, 2018).

Un ejemplo paradigmático del modo en que opera e invisibiliza los saberes indígenas el Modelo Civilizadorio Moderno Colonial es la anécdota que relata Juana de El Cocal. La *Wichí* cuenta:

“La amiga de mi hija estudia enfermería en Santa Victoria y cuando hace las prácticas tiene que mentir porque atiende a un niño que tiene vómitos y le tiene que dar pastillas, aunque sepa que está asustado y le hace falta tirar el cuerito” (2018).

La carrera de enfermería de la Universidad Nacional de Salta, que se dicta en Santa Victoria Oeste, fue creada en 2013 por iniciativa del rector de entonces como respuesta ante la problemática de fallecimiento de *Wichís* y *Guaraníes* de la zona. Esta carrera enseña atención a la salud desde la medicina occidental, y de ninguna manera un profesional de la salud puede aceptar una práctica de diagnóstico que indique “empacho por estar asustado” y que recomiende “tirar el cuerito”.

Otro modo de disciplinamiento desde la imposición de un saber único se da a través de las prácticas educativas. En la escuela se les proporciona un modo de comprensión del mundo que para los y las jóvenes de El Cocal implica una negación de su identidad:

“La señorita nos dice que hay que ser civilizados, que no podemos ser como antes porque ahora hay cosas nuevas que nos ayudan a vivir mejor, entonces a mí me da ganas de tener luz y aire acondicionado y por eso le hice un banquito para que me diera un celular” (Juan, El Cocal, 2017).

La maestra enseña -e impone- una forma de comprender el mundo que no sólo degrada la suya, sino que pretende anularla como minusválida. Se produce una reproducción de las monoculturas del saber y del rigor, enfatizando valores del mundo *occidental, civilizado, moderno*.

La Educación Intercultural Bilingüe, con sus respectivos auxiliares indígenas, se implementó como una ¿contemplación? a las características culturales indígenas. Pero el auxiliar nativo tiene dos requisitos para convertirse en docente empleado por el estado provincial: poseer conocimientos mínimos de comprensión de las lenguas indígenas locales y cursar una capacitación docente tradicional. Este modelo de educación tradicional no es inclusivo, pues no contempla saberes de la comunidad, ni tolerante, porque reprime y/o niega el rigor de los saberes *wichí*.

Otro componente que se reconoce como un sentido presente en la experiencia es el asociado al valor occidental del trabajo. Los *wichí* vienen de una tradición que el Modelo Civilizatorio Moderno Colonial asocia a lo rural, y por lo mismo a una economía de subsistencia. La expulsión de sus territorios les redujo las posibilidades de recolección y caza y los arrinconó a la conversión a asalariados/as rurales.

Lo que algunas comunidades no conservan, pero sí el *Wichí*, es su lengua:

“Nosotros les enseñamos a nuestros hijos nuestro idioma original, aunque eso después hace que les cueste la escuela, o que en el hospital nos reten porque los chicos no entienden a la enfermera” (Alberto, El Cocal, 2018).

La conservación de la lengua *Wichí* en casi todas las comunidades de este grupo dota a la comunidad de un acervo de resistencia cultural. No obstante, esto, que se presentará más adelante como ecología, es considerado un dialecto por la escuela tradicional y las maestras le adjudican la causa de los problemas en las trayectorias escolares los estudiantes *Wichí*.

Respecto de la alimentación, si bien continúa existiendo la caza y la recolección como práctica, esto representa un acto delictivo por lo que allí se presenta una contradicción entre la tradición indígena y la norma estatal moderna. Aunque algunas comunidades lo sostengan, cada vez son más los *Wichí* que migran a la agricultura de subsistencia y adoptan formas occidentales de alimentación². Esto no ha provocado que bajen los índices de mortalidad de niños *Wichí* por malnutrición, ya que se les prohíbe cazar y recolectar, pero no cuentan con todos los nutrientes para reemplazar lo que aportaban cazando y recolectando en la inmensidad del monte.

Un caso emblemático es el consumo de la hoja de coca, que en la región norte de Argentina es socialmente legítimo, pero en el resto del país no. En el Cocal se usan, por ejemplo, hierbas para la potencia sexual masculina o para abortos, sin consecuencias negativas:

“La mezcla de palo santo, chañar y yerbas rojas hace que no nazcan los bebés, aunque bueno, eso está mal para Dios” (Clementina, El Cocal, 2018).

Estas expresiones señalan, por un lado, el reconocimiento de ciertos saberes por parte de la comunidad y al mismo tiempo, la intensificación del disciplinamiento de saberes no occidentales. Estas prácticas tienen su materialización en la medicina occidental y la conocemos a partir del Viagra o del Misoprostol.

² El Anuario Estadístico de la Provincia año 2020 – avance 2021, el último publicado, en su apartado sobre el Estado nutricional de la población infantil, según Zona Sanitaria y Dpto. indica que en la zona del norte que comprende a los departamentos de Orán, San Martín y Rivadavia, de un total de 36.316 niños controlados de entre 0 a 2 años de edad, 7.727 registraron bajo peso y vale aclarar 46.469 ni siquiera fueron controlados. (Anuario Estadístico de la Provincia de Salta, 2021)

Una dimensión significativa para la construcción del hábitat de las comunidades es la expansión de la frontera agrícola a partir del auge de la soja a partir de la década de 1990. En el chaco, dicha expansión ha impuesto una suerte de laberinto para las comunidades:

“Hay montes que no tienen que tocarse porque son sagrados, hasta Dios sabe, y se enoja y después viene el río y nos lleva todo. Tenemos que cuidarlo así nos cuida y nos da lo que necesitamos” (José, El Cocal, 2018).

José no sólo relata, sino que también evalúa y analiza, en esta hibridación entre lo indígena y su vinculación con la Iglesia Anglicana, la relación entre desmontes e inundaciones. La promesa de progreso no contempló en sus inicios las consecuencias de la tala de árboles y los ciclos de extracción de los frutos de la naturaleza, algo que el pueblo *Wichí* sabe de antaño. Sus conclusiones permiten afirmar el carácter necesario de la incorporación del conocimiento local en el diseño de estrategias e intervenciones en la producción del hábitat.

La ciencia occidental, en general, y la medicina, en particular, han ido eliminando otras experiencias y prácticas sociales. Así, en las primeras reuniones con las comunidades el silencio expectante dominaba la escena cuando preguntábamos cómo íbamos a hacer algo -desde ir a pescar al Bermejo hasta recolectar leña- y la respuesta era casi siempre la misma:

“Y no sé ¿Ustedes no vienen a traer algo?” “Nosotros los esperábamos para que nos ayuden a tener agua caliente, ustedes son los que saben”. (Juan, El Cocal, 2019)

Aunque se realizaron esfuerzos en la vinculación como pares, la institución precedía siempre y las comunidades no quedaron excluidas de la concepción de que en la universidad residen los profesionales que poseen el saber válido, como una cultura jerárquica. Trabajar en la horizontalización y diálogo de saberes (Fals Borda, 1987) fue una meta permanente para el trabajo.

La producción de Monoculturas del Saber y del Rigor es quizás la forma más clara del establecimiento de una línea abisal entre quienes forman parte del mundo moderno y del progreso y quiénes no (Santos, 2009).

HACIA UNA ECOLOGÍA DE SABERES Y SENTIDOS SOBRE LAS TECNOLOGÍAS

El diálogo de saberes no implica una desacreditación de las ciencias occidentales, en base a las cuales nos hemos formado. sino que implica hacer un uso contra-hegemónico de la ciencia hegemónica. Ese es el horizonte de nuestra propuesta y modo de hacer extensión. Es necesario entender a las ciencias, ese conocimiento que tiene sus campos y sus arenas transepistémicas, como una ecología más amplia de saberes y hacer dialogar el saber científico con el saber *Wichí*. Esto no significa que todos los saberes sean iguales, superar la línea abisal no implica relativización, sino que disputar las jerarquías de saberes. La ciencia y el conocimiento occidental no son las únicas formas de saber. Las experiencias de este caso dan cuenta de eso.

Así, este proyecto de extensión se desarrolló desde el diálogo de saberes como forma de intervención en lo real.

La experiencia en un proyecto de investigación-acción participativa permite afirmar que los aportes de las comunidades no son saberes menores o complementarios. La precisión manejada por las y los integrantes de la comunidad respecto de cuándo anochece y amanece permite, entre otras cosas, determinar los niveles y horarios más altos de exposición al sol. Además, el reconocimiento del comportamiento de los animales domesticados asociados al pronóstico de tormentas de viento resultó significativo para el equipo, que solo podía notar estos eventos cuando se percibía el viento.

En El Cocal, el mantenimiento del idioma ha ayudado a las comunidades a conservar tradiciones y saberes, como por ejemplo reconocer cuando pescar y cuando no, a partir del color y el comportamiento que asumen los peces al ser pescados:

“Los ojos de los pescados, si están abiertos y asustados nos dicen que viene sucio el río, que tiraron algo o que se están acabando y que hay que parar de pescar” (Juan, El Cocal, 2019).

Algo similar sucede cuando detectan que las gallinas empollaron o que la cabra está preñada; reconocen rasgos en sus comportamientos que les permiten tomar decisiones. Lo mismo pasa con la forma de encender fuego para cocinar. Aunque nos agradecieron muy cordialmente la incorporación de las cocinas a base de biomasa para la escuela, advirtieron que en sus hogares sostendrían la cocción de sus alimentos a base de leña:

“Es difícil conseguir diariamente la cantidad de leña para la Escuela, ahí cocinan con el maestro, pero en mi casa a mi marido y a mí nos gusta el saborcito que le da el bracero que prendemos a la madrugada, a veces diferentes leñas, mi marido sabe prenderla” (Evelia, 2018).

Por otro lado, para los hombres de El Cocal es muy importante la relación con el río Bermejo, es sagrado y en él depositan confianzas y expectativas:

“El río nos dice cuándo van a venir las tormentas, cuándo van a parir las mujeres y cuándo hay que cambiar los chiqueros porque están negros y traen mal agüeros. El Bermejo, como le dicen ustedes, es un padre que da pero que quita si hacemos cosas contra el monte. Mire las inundaciones, es porque están acabando el monte” (Cacique La Misión, 2017).

A diferencia del cristianismo, que tiene ciertas deidades como Dios o Jesucristo, esta comunidad siente al río como parte de su familia y, por lo tanto, no hay una relación de sujeto-objeto en la que se manipula a la naturaleza. A algunas personas les puede resultar ininteligible esta forma de interacción, pero lo cierto es que de los “diálogos” de la comunidad *Wichí* con el Bermejo hemos observado cómo anunciaban tormentas sin ninguna nube en el cielo o cómo el cambio de chiquero hacía que los animales se reprodujeran en pocos días. Respecto a las inundaciones, es clara la coincidencia con el saber occidental: el monte talado es un terreno fértil para las inundaciones. Aunque eso no detiene el avance de la soja.

Por otro lado, en relación con la medicina, las mujeres *wichí* reconocen en el florecimiento de las diferentes plantas y árboles locales propiedades curativas. Por ejemplo, determinado color de la flor del chañar limpia los dolores de la panza, el fruto de este árbol ayuda curar lastimaduras simples, mientras que la quema del palo santo hace que insectos, roedores y alimañas se alejen. También el fruto del algarrobo enano ayuda a calmar las migrañas y posee nutrientes similares a los frutos secos, algo que combatiría la desnutrición. De acuerdo con Evelia:

“Nosotras estamos atentas al florecimiento de las plantas, tenemos con qué curarnos y qué comer, el monte nos da. La cosa pasa que ya casi no nos podemos meter al monte, nos sacan a escopetazos. Es difícil vivir así, encima no hay trabajo y cuando vamos al pueblo [Rivadavia] nos tratan mal, de vagos y nos retan que tenemos los chiquitos flacos, pero si lo que le tendríamos que dar no podemos tener” (mujer de El Cocal, 2018).

Esta mujer de la comunidad *Wichí* señala la importancia que representa el monte para garantizar su subsistencia. Pero se volvió propiedad privada un componente que es comunal en su construcción de territorialidad. A su vez, el capitalismo moderno los considera improductivos por no seguir una cultura del trabajo asalariado.

La concepción de la naturaleza a partir de un vínculo de parentesco-del pueblo *Wichí* de El Cocal en el Bermejo como padre- y no como un recurso natural para la explotación, explica gran parte de la conservación de la biodiversidad donde se asientan estos pueblos. Esto contrasta con las representaciones de la sociedad moderna occidental que no concibe a la naturaleza con esa familiaridad. Un último elemento en esta ecología es la representada por la discusión suscitada hacia el interior del equipo INENCO y compartida posteriormente con algunos referentes de la comunidad de El Cocal: ¿Es válido aprender la lengua *Wichí* para ayudarlos? No llegamos a un acuerdo en esa discusión, pues el grupo se dividió en dos: quienes creen que es una forma de colonización y quienes creen que lograrían un mejor entendimiento de las problemáticas *wichí*. Para intentar avanzar a una conclusión, se recurrió al Cacique de La Misión:

“[muchos suspiros] Mirá, para hablar *Wichí* ya están los anglicanos que nos hicieron un alfabeto y que bueno se supone que nos va a ayudar, algunos de ellos hablan *wichí*. Yo no sé, si querés hablar *wichí* vivé un tiempo como *wichí*, y si te gusta esa vida aprendételo” (2018).

Aprender y dominar idiomas diferentes es muy valorado en occidente y representa capacidades y conocimiento del mundo, aunque no se haya viajado. No necesariamente vivimos en Francia para hablar francés. En el mundo occidental no resulta imprescindible habitar el ecosistema del idioma como requisito para dominarlo. Por el contrario, la experiencia de investigación e intervención pone de manifiesto una mayor importancia en conocer y habitar el pueblo *Wichí*, más que en hablar su lengua. Aprender su idioma, siendo criollo o no indígena, constituye para algunos de ellos una extensión de prácticas colonizadoras que eliminan todo reservorio posible de su cultura ancestral.

CONCLUSIONES

En lo que atañe específicamente a la implementación de los equipos tecnológicos se analizaron las prácticas sociales como procesos de producción de sentidos a partir de la dinámica de campos de experiencia de los distintos actores puestos en diálogo. Para esto se asumió que los escenarios de comunicación que contienen los diálogos entre saberes están constituidos por trayectorias específicas que atraviesan cada uno de los participantes de los proyectos, reproduciendo órdenes dominantes o transformándolos.

La definición de las situaciones para el desarrollo de los talleres específicos para la implementación de las tecnologías plantea una dislocación que demanda el ejercicio de producir conocimientos y experiencias desde unas dimensiones que exceden el saber tecnocientífico. Se planteó esto desde la crítica a la producción de lógicas de monoculturas del saber y del rigor, a la colonialidad del saber (Lander, 2000) y a la forma transferencista de producir tecnologías de hábitat. Es decir, ontológicamente se señala la necesidad de una producción de hábitat desde actores, prácticas y campos de experiencias que usualmente son invisibilizados por el Modelo Civilizatorio Moderno Colonial.

Una forma de invisibilización de esas otras ecologías de producción del hábitat está dada por los requerimientos de las convocatorias de proyectos como el que presentamos en este trabajo. La convocatoria Compromiso Social Universitario de la línea de Voluntariado Universitario del Ministerio de Educación de la Nación establecía entre sus requisitos que:

“Los proyectos a seleccionar deben cumplir con el proceso de producción de tecnologías [entendidas como equipo tecnológico] o procesos con comprobado rigor científico y que den cuenta de un abordaje disciplinar que procure resolver problemas sociales de la comunidad” (Convocatoria SPU 2016).

Se puede observar el rasgo claramente transferencista de la institución que dirige las políticas universitarias en el orden nacional. Este sentido preestablece una jerarquía y legitimación de saberes y otras lógicas de producción de sujetos e instituciones de la modernidad que se adosan a la resolución de múltiples “problemas sociales”, negando la capacidad de agencia de las comunidades locales para resolverlos por sí mismas. Esta forma se reproduce también en la dimensión de temporalidad que proponen las convocatorias:

“Los proyectos tendrán una duración de máximo 12 meses sin la posibilidad de prórroga de estos.

La continuidad de un proyecto está sujeta a la disponibilidad de fondos y convocatorias afines” (Convocatoria SPU, 2016).

Los miembros de los proyectos señalan críticas hacia el sentido extensionista universitario que habilita temporalidad, saberes y representaciones que no consideran la generación de relaciones estables y horizontales con la comunidad a la que debe resolver sus “problemas sociales”.

Finalmente, se advierte que no se produjeron hasta la fecha experiencias con las comunidades que representen proyectos concretos, acabados, alternativos al modelo occidental. Aun así, el proyecto permitió revisar a través de memoria colectiva, comunidad y equipo técnico, la presencia de ecologías, resistencias, capacidad de agencia, (re)asignación de sentidos y producción de sentidos sobre el hábitat y sus tecnologías de manera alternativa al modelo moderno colonial capitalista.

Estos aprendizajes contribuyen al diseño y ejecución de nuevos “habilitadores de habitar” (Gonzalez, 2019). Elementos que se erigen como pilares en la producción social de hábitat y pueden aportar a la configuración de sistemas tecnológicos sociales adecuados localmente, sustentables ecológicamente y sostenibles en el tiempo.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a los participantes del “Voluntariado con participación estudiantil” “La Misión-Rivadavia: diagnóstico e intervención socio técnica para la mejora del hábitat de comunidades originarias *Wichí* en el Chaco Salteño” (Resolución SPU N° 4136/17) y a la comunidad de El Cocal (Rivadavia- Salta-Argentina).

FINANCIAMIENTO

El trabajo se financió en un 70% con el Proyecto de Voluntariado y el 30% se completó con aportes de los siguientes proyectos de investigación: 1- “Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica 2020 Serie A bajo el código PICT-2020-SERIEA-01759. PICT categoría Inicial denominado “Política

Pública y Desarrollo Científico-Tecnológico en Energías Renovables: Estrategias de Transición Sustentable en la Producción de Hábitat En Salta (2021-2023)” financiado por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (Argentina) y 2-Proyecto N° B2792/0 denominado “Sentidos Emergentes de Políticas Públicas y Desarrollos Científico-Tecnológicos Orientados a la Transición Sustentable: Derecho a la Energía, Pobreza Energética y Energías Renovables en la provincia Salta (2019-2023)” financiado por Universidad Nacional de Salta (Argentina).

REFERENCIAS

- Fals Borda, Orlando. (1987) “Ciencia propia y colonialismo intelectual. Los nuevos rumbos”. Bogotá: Carlos Valencia Editores.
- Franco, Judith (2015) “Tecnologías para la desalinización de agua. Experiencias en el NOA.”. En XXV Congreso Nacional del Agua. CONAGUA 2015. Paraná, Entre Ríos.
- Gonza, C; Gonzalez, F; Duran, P. (2022) Hábitat, Pobreza Energética y Mujeres Indígenas en el noroeste argentino: una propuesta interseccional para comunidades en zonas rurales aisladas del chaco salteño. Hábitat y Sociedad; Lugar: Sevilla.
- González, F. (2021a) Disputas de sentidos en las formas de habitar el mundo Una propuesta conceptual para (re) pensar el hábitat en términos interculturales. Nuevo Itinerario Revista de Filosofía-; Lugar: Resistencia.
- González, F. (2021b) Producción de hábitat en territorios indígenas de la provincia Salta-Argentina: dimensión-energética y disputas de sentidos. Arandú. Revista de Teoría Social, Estudios Decoloniales y Pensamiento Crítico; Lugar: Mar del Plata; vol. 2 p. 49 – 64.
- González, F; Rodríguez, N. (2020a). Hábitat y Sociología de las Ausencias: extensión universitaria con el Pueblo Kolla de Hurcuro-Salta (2018). Revista Ext; Lugar: Córdoba.
- Gonzalez, F; Rodríguez, N. (2020b) Fundamentos teórico-metodológicos en la producción de hábitat en territorios interculturales: experiencias de extensión universitaria en Salta. 2017-2019. Perspectivas Revista de Ciencias Sociales; (9): 691-723.
- Gonzalez, Facundo (2020) Producción y circulación de sentidos en la configuración de las dimensiones supra e infra hábitat. Experiencias de producción de hábitat en la Puna y en el Chaco salteños a partir de proyectos de extensión con la comunidad Kolla de Hurcuro y el pueblo *Wichí* de El Cocal (Salta, 2017-2018) Tesis (Doctor en Estudios Sociales de América Latina). Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba, pp 1-350.
- Gonzalez; F. Rodríguez, N; Hessling Herrera, F. (2020) Hábitat, energía y diálogo de saberes. Cocinas de biomasa para la comunidad *wichí* de El Cocal (Salta: experiencias de extensión desde un horizonte intercultural). E+E: Estudios De Extensión En Humanidades, 7 (10): 105-125.
- Hernández Sampieri, R. (2010) “Metodología de la investigación”. México: MacGraw-Hill Interamericana.
- Lander, Edgardo (2000) “La colonialidad del saber: eurocentrismo y ciencias sociales. Perspectivas Latinoamericanas”. Buenos Aires: CLACSO.
- Lander, Edgardo (2000) “La colonialidad del saber: eurocentrismo y ciencias sociales. Perspectivas Latinoamericanas”. Buenos Aires: CLACSO.
- rurales aisladas en el noroeste argentino. Ciencia Latina; Lugar: México; vol. 5
- Salta, P. d. (2021). Anuario estadístico: año 2020-avance 2021 / 1a ed adaptada. Salta: Secretaría General de la gobernación.
- Santos, Boaventura (2009) “Una epistemología del Sur: la reinención del conocimiento y la emancipación social”. México: Siglo XXI. CLACSO.
- Santos, Boaventura (20148) “Reflexiones para la construcción de un intelectual de retaguardia. Conversaciones con Boaventura de Sousa Santos”. Estudios del ISHiR, 9, 2014, pp. 75-97.
- Yuni, J. y Urbano C. (2016). “Técnicas para investigar”. Córdoba: Bruja.

SENSES AROUND THE ENERGETIC DIMENSION IN HABITAT PRODUCTION PROCESSES IN INDIGENOUS TERRITORIES IN THE PROVINCE OF SALTA

ABSTRACT: This paper presents a sociological analysis of the university volunteer project "La Misión-Rivadavia: diagnosis and socio-technical intervention for the improvement of the habitat of Wichí communities in the Chaco Salteño" (Salta Province). The aim was to study the habitat conditions of the Wichí community of El Cocal and consisted of transferring biomass-based cookers to a bilingual school in the area. The project was carried out by the Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional and the Asociación Civil Amtena, partially financed with funds from the "University Social Commitment" programme of the National Secretariat of University Policies during the years 2017 and 2020. The results identified features in the production of monocultures of knowledge and rigour and the emergence of ecologies that de-rationalise the production of habitat in a territory that resists the regimes of the Modern Colonial Civilisational Model in its facets of coloniality/colonialism and capitalism. At the same time, the "Habitat Enablers" learning emerges, which allows us to review the (re)production of senses of habitat in actors who are culturally different from Westerners, with a focus on the energetic dimension.

KEY WORDS: Habitat, Wichís, Energy.

COMPORTAMIENTO EN ESCALA DEL COSTO NIVELADO DEL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN LATINOAMÉRICA

Ernesto Coutsiers^{1,2}, Marcelo Gea³, Ramiro Rodríguez^{1,4}

¹ Calden Consultoría SRL - Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba
www.caldenconsultoria.com +54 351 7000717, ecoutsiers@caldenconsultoria.com

² Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta - www.exactas.unsa.edu.ar +54 387 4255408, ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar

³ Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta
www.inenco.unsa.edu.ar +54 387-4255424, geam@unsa.edu.ar

⁴ Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba
www.fcefyn.unc.edu.ar +54 351 5353800, ramiro.rodriguez@unc.edu.ar

RESUMEN: En el almacenamiento de hidrógeno es probable que se encuentre una de las principales ventajas comparativas de este combustible, ya que representa la posibilidad de acumular energía proveniente de fuentes renovables no convencionales para, de esta manera, contrarrestar el fenómeno de estacionalidad de generación, facilitar su cadena logística y compensar fluctuaciones de demanda. La forma más desarrollada de almacenamiento de la molécula de hidrógeno en la actualidad es como gas comprimido utilizando: recipientes de presión, tuberías o cavernas. En este trabajo se estudió el comportamiento en escala del costo nivelado de almacenamiento para diversos países de Latinoamérica, utilizando referencias de diferentes escalas y considerando las características particulares de costo del capital, consumos de energía eléctrica, recursos humanos, pérdidas, entre otros aspectos. Como principal resultado se observó la existencia de economía de escala de importancia teniendo como referencia la industria química. El comportamiento ante escala es similar en todos los países analizados. Sin embargo, los costos nivelados de los países presentados se diferencian por el impacto del costo de capital y los costos de energía eléctrica.

Palabras clave: Almacenamiento de Hidrógeno, Hidrógeno Verde, Cadena de Valor de Hidrógeno, Costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de hidrógeno (H₂) se considera una ventaja comparativa en varias aplicaciones debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas y la versatilidad en la entrega de energía. Dado que puede producirse a partir de fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC), como la solar y la eólica, mediante electrólisis de agua, permite almacenar energía cuando la generación excede la demanda y liberarla cuando sea necesario, lo que contribuye a la estabilización de la red eléctrica y la integración de energías renovables intermitentes. Se utiliza en vehículos de celda de combustible (FCEV), lo que permite una movilidad sostenible al producir cero emisiones locales, con un tiempo de recarga similar al de los vehículos de combustión interna, en contraste con los vehículos eléctricos que dependen de baterías que ostentan tiempos de recarga más largos.

La producción y almacenamiento pueden ser locales, permitiendo la generación y el almacenamiento de energía en áreas remotas o descentralizadas, lo que reduce la dependencia de las redes eléctricas

centralizadas. Además de esta flexibilización que permite integrar las ERNC en los sistemas de energía, el almacenamiento de H₂ es escalable y permite que grandes cantidades de energía sean almacenadas durante períodos prolongados sin sufrir pérdidas significativas, lo que lo hace adecuado para aplicaciones estacionales o para cubrir picos de demanda. A diferencia de algunas opciones de almacenamiento de energía que dependen de ubicaciones geográficas específicas (como embalses para almacenamiento hidroeléctrico), el almacenamiento de H₂ es más flexible en términos de ubicación y puede implementarse en una variedad de entornos. Es por esto por lo que se están estudiando en la actualidad métodos viables para almacenar H₂ en diferentes escalas de tiempo y duración (Papadias & Ahluwalia, 2021).

No obstante, el almacenamiento de H₂ conlleva un desafío (Andersson & Grönkvist, 2019). Al ser la molécula más ligera de todas, el hidrógeno gaseoso tiene una densidad muy baja: 1 kg de hidrógeno gaseoso ocupa más de 11 [m³] en condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica (Ausfelder et al., 2017). Así, para que el almacenamiento de H₂ sea económicamente viable, se debe aumentar su densidad de almacenamiento.

La forma más desarrollada de almacenamiento de H₂ molecular en la actualidad es como gas comprimido, que de acuerdo con su escala, geometría o naturaleza se divide como almacenamiento en:

- i. Recipiente de presión cilíndrico.
- ii. Recipiente de presión esférico.
- iii. Tubería, con sus variantes sobre la superficie o enterradas.
- iv. Cavernas, con sus variantes de acueductos, cavernas de sal, cavernas de roca dura revestida, entre otras variantes.

De acuerdo con las cantidades de H₂ a almacenar, las opciones presentadas se utilizan en el orden dispuesto en la enumeración anterior. De esta manera, pequeñas masas de H₂ se almacenan en tanques cilíndricos presurizados para llegar a grandes escalas de almacenamiento en cavernas.

En este trabajo se estudia el comportamiento en escala del costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno (LCHS) para diversos países de Latinoamérica, utilizando referencias de diferentes escalas y considerando las características particulares de costo del capital, consumos de energía eléctrica, recursos humanos, pérdidas, entre otros aspectos.

Las condiciones de contorno empleadas en el desarrollo de este estudio consideran que el suministro eléctrico supuesto, contempla la conexión directa con el generador de renovables. Las presiones a las cuales se comprime el gas, en cada caso de almacenamiento, son las que se toman de las referencias correspondientes con la que resulta el menor LCHS. En la Tabla 1 se presentan los rangos de presiones y las masas considerados en las referencias. Las tasas de costo de capital utilizadas son calculadas en base a la referencia (Coutsiers et al., 2022) y se presentan en la Tabla 2.

METODOLOGÍA

Costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno

El costo nivelado de almacenamiento (LCHS) se define con la Ec. (1) tal cual lo indica la referencia (Abdin et al., 2022).

$$LCHS = \frac{C_{CapEx} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{OpEx}}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_{H_2}}{(1+r)^i}} \quad (1)$$

Donde:

C_{CapEx}: Costos de inversión (conocido como CapEx, del inglés Capital Expenditures).

C_{OpEx} : Costos de operar y mantener (conocido como OpEx, del inglés Operational Expenditures).

M_{H_2} : Masa de hidrógeno almacenada.

r : tasa de costo de capital.

i : año del flujo.

n : horizonte del proyecto.

Los costos de operar y mantener, por su parte pueden desagregarse de acuerdo con la Ec. (2).

$$C_{OpEx} = C_{EI} + C_L + C_{HR} + C_o \quad (2)$$

Donde:

C_{EI} : Costo de electricidad, que incluye la generación, la transmisión y distribución en los casos que aplique.

C_L : Costo de las pérdidas de hidrógeno operativas, tanto en las operaciones de carga y descarga como durante el almacenamiento.

C_{HR} : Costo de los recursos humanos.

C_o : otros costos.

De esta manera, se analizan cada uno de los componentes del costo nivelado como se desagrega a continuación.

Costo de capital

El costo de capital tiene dos componentes, el costo de la inversión y la tasa de costo de capital.

Costo de la inversión

Para el costo de inversión se analizaron 25 alternativas de almacenamiento de diferentes escalas, contenidas en las clases e intervalos que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Detalle de las alternativas de almacenamiento analizadas. Fuente: Elaboración Propia.

Tipo de almacenamiento	Rango de capacidad - kg	Rango de presiones consideradas - bar	Referencias
Recipiente de presión cilíndrico	60-1.500	160-845	(Zheng, 2016), (Feng et al., 2016), (Hua et al., 2011), (Tietze et al., 2016)
Recipiente de presión esférico	270-4.682	8-20	(Tietze et al., 2016)
Ducto/Ducto enterrado	1.000-64.714	47-100	(Papadias & Ahluwalia, 2021), (Tietze et al., 2016)
Caverna de sal	20.000-50.000	70-190	(Papadias & Ahluwalia, 2021)
Caverna de roca dura revestida	20.000-50.000	75-300	(Papadias & Ahluwalia, 2021)

En todos los casos se analiza si la inversión considera la compresión y auxiliares de la instalación. En caso de no considerarse la inversión de compresión, se utiliza para valoración lo presentado en la referencia (Amos, 1998) de donde se ajusta la curva presentada en la Fig. 1.

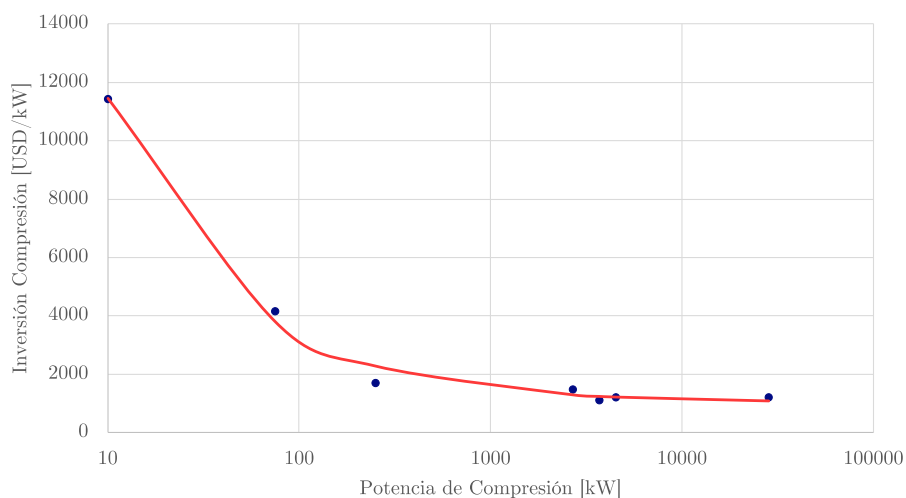


Figura 1: Costo de inversión de compresión en función de la potencia de compresión. Fuente: elaboración propia a partir de la información de la referencia (Amos, 1998).

Los costos del compresor se basan en la cantidad de trabajo realizado por el mismo, que depende de la presión de entrada, la presión de salida y el caudal. De este modo, según (Amos, 1998) y las referencias citadas en ese trabajo en la sección costos de capital del equipo de almacenamiento, los compresores más grandes son varias veces más baratos por unidad que los más pequeños, ya que los costos de capital de los compresores tienen un exponente de tamaño de 0,80. Esta es una medida que se utiliza en análisis de costos y economía para entender cómo cambian los costos de capital a medida que varía el tamaño de los compresores. En otras palabras, a medida que el tamaño de los compresores aumenta, los costos de capital aumentan, pero a una tasa más lenta de lo que se podría esperar si el aumento fuera proporcional. Para los sistemas auxiliares, en el caso que no estuvieran contemplados, se consideraron un 20% de la inversión de compresión, consistente con lo presentado en (Amos, 1998).

El costo de la inversión se compone principalmente de bienes transables internacionalmente. Se incorpora además en este estudio el supuesto de inexistencia de efectos diferenciales entre países de incentivos fiscales al hidrógeno verde (H2V), impuestos internos, aranceles y un impacto global uniforme de los fletes de equipamientos. Así, el costo de la inversión resulta independiente del país de análisis.

Tasa de costo de capital

A diferencia de lo supuesto en el costo de inversión, la tasa de costo de capital es fuertemente dependiente de cada país en análisis. De esta manera se modela utilizando el costo promedio ponderado de capital calculado de acuerdo con el modelo presentado en la referencia (Coutsiers et al., 2022) utilizando valores de cierre de diciembre de 2022. Así, el costo promedio ponderado de capital resulta de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2 en sus variantes nominales (en minúsculas), reales (en mayúsculas), antes (*bt*) y después de impuestos (*at*).

Tabla 2: Tasa de costo promedio ponderado de capital resultante para los diferentes países referenciales de Latinoamérica, Fuente: elaboración propia a partir de la metodología de la referencia (Coutsiers et al., 2022)

País	$wacc_{at}$	$WACC_{at}$	$wacc_{bt}$	$WACC_{bt}$
Argentina	18,97%	16,30%	27,10%	24,24%
Brasil	9,17%	6,71%	13,89%	11,33%
Chile	7,19%	4,78%	9,85%	7,38%
Colombia	8,10%	5,67%	11,92%	9,40%
México	8,20%	5,76%	11,71%	9,20%
Perú	7,89%	5,47%	11,19%	8,69%

Es importante destacar en esta instancia que el modelo de cálculo se realizó en términos reales con valoraciones en dólares americanos de diciembre de 2022, todos los valores monetarios consignados en este trabajo se encuentran en esa base salvo indicación explícita. La tasa de costo promedio ponderado de capital utilizada es, en consecuencia, real y se optó por la variante antes de impuestos para considerar este componente de manera implícita ($WACC_{bt}$). Esta dispersión regional en el costo de capital se atribuye al fuerte impacto que genera el riesgo país, para el caso de Argentina.

Costo de la Energía Eléctrica

La energía eólica puede generar electricidad a partir de aerogeneradores ubicados en tierra firme o en el mar y se las denomina *onshore* y *offshore*, respectivamente. Para el costo de la energía eléctrica se consideró en este caso que el almacenamiento se ubica en el lugar de producción del recurso renovable eólico (para el caso de Colombia del resultado de la Ronda 2 complementaria). La generación eléctrica postulada es renovable y los precios utilizados provienen de las referencias (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 2020; Renewable Energy Agency, 2022). Estos valores se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Precios de la energía renovable para diferentes países y fuentes utilizados en este estudio, Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 2020; Renewable Energy Agency, 2022).

LCOE USD/MWh	Eólico <i>Onshore</i>	Ronda 2019 complementaria
Argentina	74,1	
Brasil	26,4	
Colombia		39,3
Chile	44,0	
México	47,0	
Perú	37,4	

En este trabajo se supone que el resultado diferencial encontrado para el caso de Argentina tomado de las referencias indicadas se debe a lo mencionado anteriormente en referencia al costo de capital.

Otros costos de operación y mantenimiento

Los costos de recursos humanos estimados en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021), fueron ajustados con paridad de poder de compra de cada país a partir del indicador Big Mac Index de la revista “*The Economist*” que puede encontrarse en la referencia (Statista, 2022).

En el caso de los costos de pérdidas, se utilizaron los niveles de pérdida de H₂, para carga, descarga y almacenamiento, postulados en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021) y valorados al costo de energía eléctrica a partir de ratios típicos de consumo de electrolizadores, es decir manteniendo un enfoque marginalista. Otros costos de menor impacto también son considerados tal cual fueron presentados en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021).

En el diagrama de la Fig. 2, se presenta el proceso de modelado, las cajas azules representan los modelos o variables adoptadas de las referencias presentadas y las cajas naranja son las variables y modelos adaptados a la condición de cada uno de los países latinoamericanos de referencia analizados.

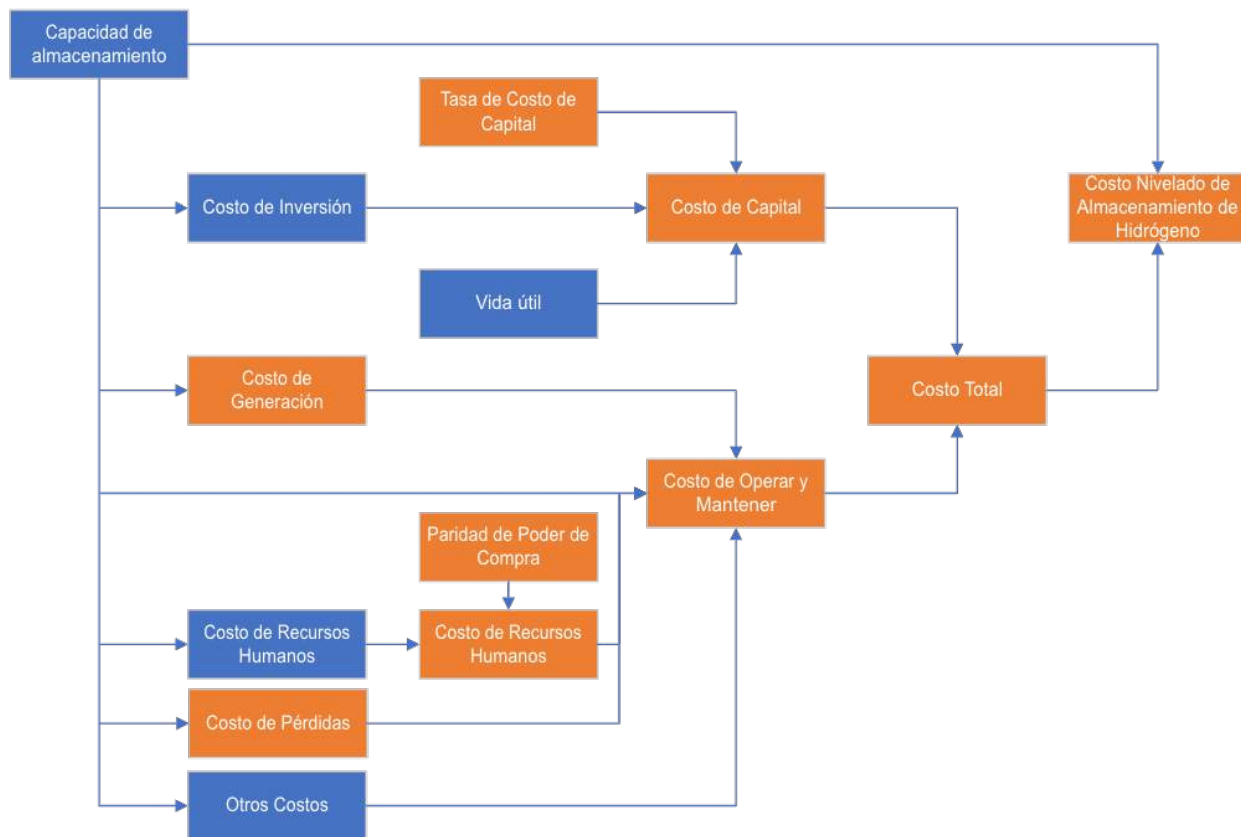


Figura 2: Flujograma del modelo de cálculo del costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno, Fuente: elaboración propia.

Economía de escala

Es usual que una unidad de capacidad en una planta grande cueste menos que una unidad de capacidad en una planta pequeña. Esta misma propiedad, conocida como economía de escala, se encuentra en los equipos de proceso. El trabajo de (Berthouex, 1972) y las referencias citadas en el mismo, ilustran este hecho con diagramas log-log de costo por unidad de capacidad vs capacidad y utilizan la Ec. (3) para ajustar la curva de costos:

$$\text{Log}(c) = a - b \text{Log}(Q) \quad (3)$$

Donde:

c = costo por unidad de capacidad.

Q = capacidad de diseño.

a y b son constantes empíricas.

De este modo, para capturar la economía de escala se propuso ajustar el LCHS adaptando la Ec. (3) a la Ec. ecuación (4), con $c = \text{LCHS}$ y $Q = M_{\text{H}_2}$.

$$\text{Log}(\text{LCHS}) = a - b \text{Log}(M_{\text{H}_2}) \quad (4)$$

El valor de $b = 0$ indica que el costo no depende de la escala, $b = 1$ indica una dependencia lineal del costo con la escala y cuando $b > 1$ existen deseconomía de escala. Así, si se cumple la condición $b < 1$, se tienen economías de escala en la tecnología de almacenamiento. De esta manera, en este estudio se analizará el LCHS de diferentes alternativas de almacenamiento de hidrógeno comprimido para luego ajustar los parámetros de la ecuación (4).

RESULTADOS

Los resultados de LCHS para Brasil y Argentina pueden observarse en la Fig. 3:

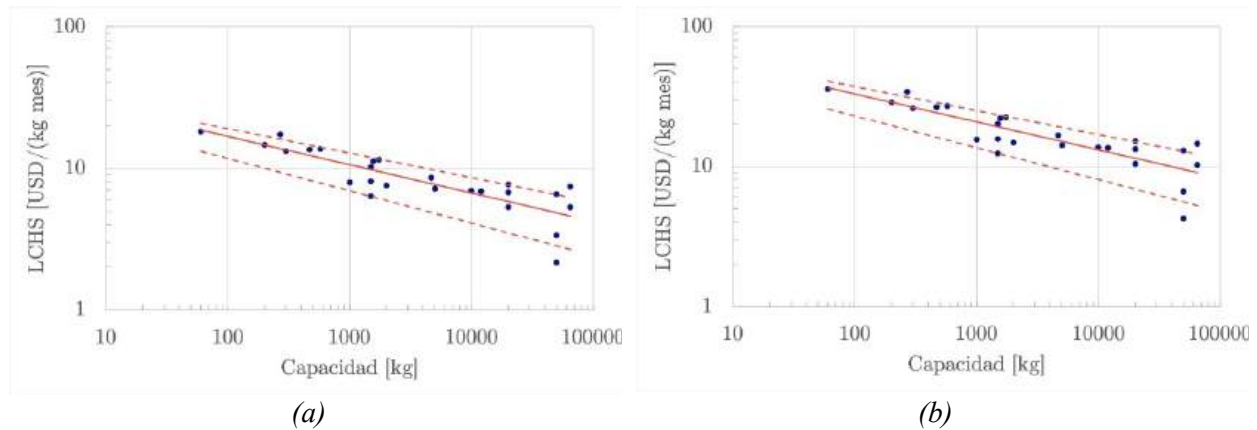


Figura 3: Costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno para Brasil (a) y Argentina (b). Se observa también aquí el ajuste y sus bandas de confianza. Fuente: elaboración propia.

Estimando el resultado de los ajustes para los países referenciales de Latinoamérica, se obtiene lo presentado en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultado de los parámetros de ajuste a y b juntamente con el indicador de bondad de ajuste r^2 , Fuente: elaboración propia.

	a	b	r^2
Argentina	$1,91 \pm 0,10$	$0,200 \pm 0,027$	0,697
Brasil	$1,62 \pm 0,10$	$0,200 \pm 0,027$	0,696
Chile	$1,48 \pm 0,10$	$0,198 \pm 0,027$	0,700
Colombia	$1,56 \pm 0,10$	$0,199 \pm 0,027$	0,698
México	$1,55 \pm 0,10$	$0,198 \pm 0,027$	0,699
Perú	$1,53 \pm 0,10$	$0,199 \pm 0,027$	0,698

Si se grafican las curvas para los diferentes países de manera comparativa, se obtiene lo presentado en la Fig. 4. Los coeficientes de correlación del orden de 0,7 indican relativa bondad de ajuste y validez del modelo propuesto.

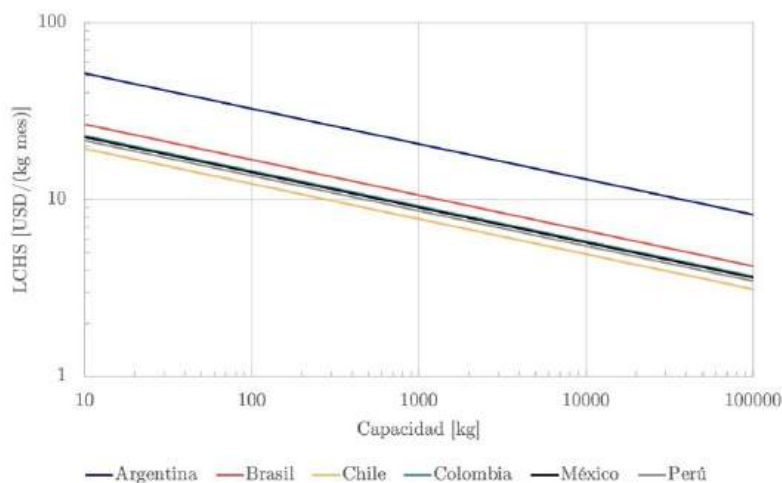


Figura 4: Ajuste de LCHS resultante para los diferentes países referenciales de Latinoamérica para escalas de 10 a 100.000 kg de H_2 , Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

Con el fin de estimar la incidencia en el LCHS de los diferentes costos encontrados en los países analizados, se lleva adelante una comparación entre ellos.

Para considerar la variación del costo de inversión en la compresión del H₂ y auxiliares de la instalación, el análisis de la Fig. 1 muestra que en los intervalos comprendidos entre (10 – 100) y (100 – 1.000) kW de potencia de compresión, el costo de inversión disminuye de manera aproximadamente lineal con pendientes $m = -79,5 \text{ USD/kW}^2$ y $m = -1,3 \text{ USD/kW}^2$, respectivamente, mientras que por encima de los 1.000 kW este costo exhibe solo una pequeña variación, lo que indica que la escala en la potencia de compresión es muy significativa en el intervalo (10 – 1.000) kW, situación que se traslada a los sistemas auxiliares.

Para valorar las diferencias en la tasa de costo promedio ponderado de capital antes de impuestos en sus variantes nominales reales, se toman los valores de la Tabla 2, considerando como referencia el menor valor que pertenece a Chile, resultando diferencias porcentuales en escala creciente de 17,75%; 24,66%; 27,37%; 53,52% y 228,46%; correspondientes a Perú, México, Colombia, Brasil y Argentina, respectivamente. Respecto de las diferencias en el LCOE, considerando como referencia el menor valor que pertenece a Brasil, las diferencias en USD/MWh en escala creciente ahora resultan: 41,67%; 48,86%; 66,67%; 78,03% y 180,68%; correspondientes a Perú, Colombia, Chile, México y Argentina, respectivamente. Observando las Figs. 3 y 4, queda de manifiesto que estos costos analizados conducen a las diferencias encontradas en el LCHS en USD/kg/mes, en particular a baja capacidad, aunque la brecha disminuya con la escala.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el comportamiento a escala del LCHS para diversos países de Latinoamérica, utilizando referencias de diferentes escalas y considerando las características particulares de costo del capital, consumos de energía eléctrica, recursos humanos y pérdidas, entre otros aspectos. Se observó que, aunque el comportamiento de escala presenta una tendencia similar en todos los países analizados, los LCHS se diferencian por el impacto del costo de capital y los costos de energía eléctrica. Esta diferencia es notable a escalas de capacidad bajas (entre 10 y 10.000 kg) y por encima de los 10.000 kg se empareja, salvo en el caso de Argentina, que muestra una diferencia sustancial debido a los costos más altos que componen el LCHS.

Por otro lado, a partir de los resultados presentados en la Tabla 4 se puede observar la existencia de economía de escala en el LCHS. Dado a que el parámetro b resultante es del orden de 0,2, la economía obtenida con la escala es elevada ya que, de manera referencial, en la industria química se manejan rangos entre 0,5 y 0,9.

Se observa también que la diferencia entre las condiciones de los diversos países analizados se refleja en el parámetro a donde Argentina tiene un mayor valor y se va reduciendo hasta el caso de Chile en otro extremo. Los coeficientes de correlación del orden de 0,7 indican relativa bondad de ajuste y validez del modelo propuesto.

REFERENCIAS

- Abdin, Z., Khalilpour, K., & Catchpole, K. (2022). Projecting the levelized cost of large-scale hydrogen storage for stationary applications. *Energy Conversion and Management*, 270, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116241>
- Amos, W, A, (1998). Costs of Storing and Transporting Hydrogen. <http://www.doe.gov/bridge/home.html>
- Berthouex, P, M. (1972). Evaluating Economy of Scale. In *Journal (Water Pollution Control Federation)* (Vol, 44, Issue 11). <http://www.jstor.org>. URL: <http://www.jstor.org/stable/25037656>.

- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2022). Estimación de la tasa de costo de capital para proyectos de energía renovable en Latinoamérica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente – AVERMA*, 26, 369–380.
- Feng, Z., Wang, Y., Lim, Y. C., Chen, J., Gibson, B., Manager, D., & Rustagi, N. (2016). Steel Concrete Composite Vessel for 875 bar Stationary Hydrogen Storage; DOE Hydrogen and Fuel Cells Program FY 2016 Annual Progress Report.
- Hua, T. Q., Ahluwalia, R. K., Peng, J. K., Kromer, M., Lasher, S., McKenney, K., Law, K., & Sinha, J. (2011). Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(4), 3037–3049, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.090>.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2020). Procesos competitivos para el financiamiento de proyectos de energías renovables. www.olade.org.
- Papadías, D., & Ahluwalia, R. K. (2021). Bulk storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(70), 34527–34541. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.08.028>.
- Renewable Energy Agency. I. (2022). Renewable power generation costs in 2021, www.irena.org
- Statista, (2022). Prices for a Big Mac in selected Latin American countries as of July 2022, by country (in US, dollars). <https://www.statista.com/statistics/869048/big-mac-price-index-latin-america-country/>.
- Tietze, V., Luhr, S., & Stolten, D. (2016). *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*. <https://doi.org/10.1002/9783527674268.ch27>.
- Zheng, J. (2016). Research State of the Art and Knowledge Gaps in High Pressure Hydrogen Storage. https://hysafe.info/wp-content/uploads/2016/09/07_Research-State-of-the-Art-and-Knowledge-Gaps-in-High-Pressure-Hydrogen-Storage.pdf.

SCALE BEHAVIOR OF THE LEVELIZED COST OF COMPRESSED HYDROGEN STORAGE IN LATIN AMERICA

ABSTRACT: One of the main comparative advantages of this fuel is likely to be found in the storage of hydrogen, since it represents the possibility of accumulating energy from renewable sources to, in this way, counteract the phenomenon of generation seasonality, facilitate its logistics chain, and compensate for fluctuations in demand. The most developed way of storing the hydrogen molecule today is in the form of compressed gas using pressure vessels, pipes, or caverns. In this paper, the scale behavior of the levelized cost of storage for various Latin American countries was studied, using references from different scale, and considering the characteristics of cost of capital, electricity consumption, human resources, losses, among other aspects. As the main result, the existence of an important economy of scale was observed, taking the chemical industry as a reference, The behavior before scale is similar in all the countries analyzed, However, the levelized costs of the countries presented are differentiated by the impact of the cost of capital and the costs of electrical energy.

Keywords: Hydrogen Storage, Green Hydrogen, Hydrogen Value Chain, Levelized Cost of Hydrogen Storage.

COSTO NIVELADO DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO SUBTERRÁNEO DE HIDRÓGENO EN LATINOAMÉRICA

Ernesto Coutsiers^{1,2}, Marcelo Gea³, Ramiro Rodríguez⁴

¹Calden Consultoría SRL – Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba
www.caldenconsultoria.com +54 351 7000717, ecoutsiers@caldenconsultoria.com

²Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta www.exactas.unsa.edu.ar +54 387 4255408, ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar

³Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Consejo Nacional de Investigaciones - Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta www.inenco.unsa.edu.ar +54 387-4255424, geam@unsa.edu.ar

⁴Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba - www.fcefyn.unc.edu.ar +54 351 5353800, ramiro.rodriguez@unc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se estimaron los costos nivelados de almacenamiento de hidrógeno a diferentes capacidades en cavernas de sal y de roca dura revestida para países referenciales de Latinoamérica. Se observó que el componente de costo de capital es el más importante en el costo nivelado y representa entre un 80 y 90% del mismo. El costo nivelado de almacenamiento en caverna de sal se reduce con la escala iniciando en valores entre 10 y 15 USD/kg/año para 100 t almacenadas y llegando a niveles entre 5 y 7 USD/kg/año para 3000 t para la mayoría de los países referenciales de Latinoamérica. Salvo en Argentina que posee valores más elevados (28 USD/kg/año para 100 t y 6.3 USD/kg/año para 3000 t) consecuencia de su costo de capital. Para el caso de roca dura revestida, estos valores oscilan cercanos a los 30 USD/kg/año para 100 t y se reducen al rango de 6 a 7 USD/kg/año para 3000 t. Análogamente a la caverna de sal, Argentina presenta 46 y 13.6 USD/kg/año para 100 y 3000 t respectivamente. Todos estos valores consideran energía eléctrica de fuente eólica local (en Colombia es el precio resultante de la ronda 2019 complementaria).

Palabras clave: Almacenamiento de Hidrógeno, Hidrógeno Verde, Cadena de Valor de Hidrógeno, Costo nivelado de almacenamiento de Hidrógeno.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento geológico se usa ampliamente en las industrias de energía del petróleo, el gas natural y el aire comprimido. Para ilustrar la escala de esta utilización, aproximadamente 800 millones de barriles de petróleo y miles de millones de pies cúbicos de gas natural se almacenan geológicamente en los EE. UU. (Lord et al., 2014).

El almacenamiento geológico ofrece las siguientes características diferenciales (Lord et al., 2014):

- i. Alto volumen disponible de almacenamiento
- ii. Posibilidad de funcionar como activo financiero (o relacionado a un activo financiero)
- iii. Sirve para garantizar la seguridad de suministro ante escasez o congestión del sistema.

El tipo de formación rocosa tiene efectos profundos en la viabilidad física y económica para utilizar ese sitio. Existen cuatro tipos principales

- i. Las cavernas de sal,
- ii. Los yacimientos de petróleo y gas agotados
- iii. Los acuíferos
- iv. Las cavernas de roca dura revestidas.

Sobre el primer tipo de almacenamiento bajo tierra -la caverna de sal- existe una amplia experiencia. Para el caso particular de hidrógeno (H_2) las cavernas de sal son utilizadas en Estados Unidos, Gran Bretaña y Alemania (Olaf Krunck et al., 2013; Panfilov, 2016; Tarkowski, 2019). Sin embargo, el almacenamiento de hidrógeno dentro del mismo tipo de instalaciones, actualmente utilizadas para el gas natural, puede agregar nuevos desafíos operativos a la industria del almacenamiento subterráneo (Lord et al., 2014).

Las paredes de una caverna de sal son estables e impermeables al gas durante la vida útil de la instalación de almacenamiento. Las propiedades plásticas de la sal protegen tales cavernas contra la aparición y extensión de fracturas y la pérdida de impermeabilidad (Panfilov, 2016). Es conocido que las bacterias no pueden sobrevivir en salmuera altamente concentrada y, por lo tanto, en las cavernas de sal no transforman el hidrógeno en otros gases (Panfilov, 2016). Desde un punto de vista práctico, la solución de almacenamiento en cavernas de sal es muy flexible en términos de volumen de almacenamiento, y también en términos de modularidad, ya que se pueden lixiviar varias cavernas en un solo sitio para adaptar la capacidad de almacenamiento global a los cambios en la demanda (Panfilov, 2016).

Por otro lado, las estructuras de sal no tienen un uso tan difundido debido a un volumen de caverna restringido (en comparación con un acuífero) y la poca disponibilidad de depósitos de sal adecuados para construcciones de cavernas lixiviadas con sal (Olaf Krunck et al., 2013; Panfilov, 2016; Tarkowski, 2019). En regiones donde no hay disponibilidad de cavernas de sal ni arenisca porosa, puede existir una alternativa de almacenamiento que está siendo desarrollada recientemente. De esta manera, se ha explorado tecnología en la excavación de cavernas en roca dura utilizando como recubrimiento de esas cavernas, en su totalidad, con revestimientos de acero o plástico. Este revestimiento actúa como una capa impermeable y contendrá completamente el gas. Las cavernas diseñadas de esta manera también funcionarán a presiones mucho más altas que las cavernas de roca dura sin revestimiento, por sus mejores condiciones de impermeabilidad (Lord et al., 2014; Olaf Krunck et al., 2013; Papadias & Ahluwalia, 2021).

El desarrollo de una caverna revestida consiste en excavar en una roca ígnea o metamórfica, construir una capa de hormigón entre esa roca y luego, el revestimiento impermeable. La roca huésped debe ser capaz de resistir y absorber la carga de presión. La capa de hormigón está diseñada para transferir la carga de presión del revestimiento a la roca circundante, así como para proporcionar las características superficiales para la aplicación del revestimiento. Estos revestimientos pueden fabricarse con acero inoxidable o plástico de polipropileno.

Este tipo de instalaciones, se presentan como soluciones económicamente viables para el almacenamiento a gran escala dentro de la cadena de valor del hidrógeno, inclusive con algunas soluciones en el mismo sitio donde se genera la energía renovable.

Acumulaciones naturales del subsuelo - Hidrógeno oro blanco

Se destaca el hallazgo reciente referido a hidrógeno geológico. Investigadores dicen que las reacciones agua-roca en las profundidades de la Tierra generan continuamente H_2 que se filtra a través de la corteza y, a veces, se acumula en trampas subterráneas. Se considera que si este H_2 natural forma reservas considerables, podría ser suficiente para satisfacer la creciente demanda mundial durante miles de años, según un modelo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que se presentó en octubre de 2022 en una reunión de la Sociedad Geológica de América (Hand, 2023). La reacción de formación de H_2 subterráneo podría

estar vinculada a la oxidación del hierro en agua con desprendimiento de H₂, representada por la Ec. química: $2Fe_{(s)} + 3H_2O_{(l)} \rightarrow Fe_2O_{3(s)} + 3H_{2(g)}$. Esta reacción de oxidación ocurre cuando el hierro se expone al oxígeno presente en el agua, lo que provoca la formación de óxido de hierro (hematita) y la liberación de H₂ gaseoso. La rentabilidad de la extracción de H₂ del subsuelo dependerá de factores como los costos de extracción, almacenamiento y transporte, así como del precio del H₂ en el mercado. La mayor parte del H₂ está a demasiada profundidad o muy lejos de la costa, o si no hay acumulaciones que son demasiado pequeñas para que sean económicamente viables. Asimismo, podría tener impactos ambientales similares a los de la extracción de otros recursos, como la emisión de GEI durante la extracción y el procesamiento. Descubrir dónde existen grandes volúmenes de H₂ geológico y encontrar formas de extraer el gas de manera segura son desafíos que aún deben resolverse.

En este trabajo, se procura obtener el costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno subterráneo geológico para caverna de sal y roca dura revestida. Se toma como base el trabajo (Papadias & Ahluwalia, 2021) donde se analizan estas opciones en EE. UU. parametrizándola con las variables económicas de los países referenciales de Latinoamérica. Es importante destacar que este estudio no hace un análisis de valor sobre la viabilidad geográfica de los diferentes tipos de almacenamiento en caverna para cada país, lo cual requerirá de una instancia de análisis que escapa al alcance postulado aquí.

METODOLOGÍA

Costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno

El costo nivelado de almacenamiento (*LCHS*) se define con la Ec. (1) tal cual lo indica la referencia (Abdin et al., 2022):

$$LCHS = \frac{C_{CapEx} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{OpEx}}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_{H_2}}{(1+r)^i}} \quad (1)$$

Donde:

C_{CapEx} : Costos de inversión (conocido como CapEx, del inglés *Capital Expenditures*).

C_{OpEx} : Costos de operar y mantener (conocido como OpEx, del inglés *Operational Expenditures*).

M_{H_2} : Masa de hidrógeno almacenada.

r : tasa de costo de capital.

i : año del flujo.

n : horizonte del proyecto.

Los costos de operar y mantener, por su parte pueden desagregarse de acuerdo con la Ec. (2):

$$C_{OpEx} = C_{El} + C_L + C_{HR} + C_o \quad (2)$$

Donde:

C_{El} : Costo de electricidad, que incluye la generación, la transmisión y distribución en los casos que aplique

C_L : Costo de las pérdidas de hidrógeno operativas, tanto en las operaciones de carga y descarga como durante el almacenamiento.

C_{HR} : Costo de los recursos humanos.

C_o : otros costos.

De esta manera, se analizan cada uno de los componentes del costo nivelado como se desagrega a continuación.

Costo de capital

El costo de capital tiene dos componentes, el costo de la inversión y la tasa de costo de capital. Para el costo de la inversión, se tiene un análisis específico en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021), donde se ajusta el costo de inversión para almacenamiento subterráneo con la siguiente función:

$$C_{CapEx} = e^{a(\ln(M_{H_2}))^2 + b\ln(M_{H_2}) + c} \quad (3)$$

Donde los coeficientes para almacenamiento son presentados en la Tabla 1, considerando que el parámetro C_{CapEx} se encuentra en dólares estadounidenses de abril de 2021 y M_{H_2} en toneladas.

Tabla 1: Coeficientes del ajuste del costo de inversión para almacenamiento bajo tierra propuesto por la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021)

Tipo de almacenamiento	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Caverna de sal	0.092548	1.6432	10.161
Caverna de roca dura revestida	0.095803	1.5832	10.332

El costo de la inversión se compone principalmente de bienes transables internacionalmente. Se incorpora además en este estudio el supuesto de inexistencia de efectos diferenciales entre países de incentivos fiscales al hidrógeno verde, impuestos internos, aranceles y un impacto global uniforme de los fletes de equipamientos. Así, el costo de la inversión resulta independiente del país de análisis.

A diferencia de lo supuesto en el costo de inversión, la tasa de costo de capital es fuertemente dependiente de cada país en análisis. De esta manera se modela utilizando el costo promedio ponderado de capital calculado de acuerdo con el modelo presentado en la referencia (Coutsiers et al., 2022) utilizando valores de cierre de diciembre de 2022. Así, el costo promedio ponderado de capital resulta de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2 en sus variantes nominales (en minúsculas), reales (en mayúsculas), antes (*bt*) y después de impuestos (*at*).

Tabla 2: Tasa de costo promedio ponderado de capital resultante para los diferentes países referenciales de Latinoamérica. Fuente: elaboración propia a partir de la metodología de la referencia (Coutsiers et al., 2022)

País	<i>wacc_{at}</i>	<i>WACC_{at}</i>	<i>wacc_{bt}</i>	<i>WACC_{bt}</i>
Argentina	18.97%	16.30%	27.10%	24.24%
Brasil	9.17%	6.71%	13.89%	11.33%
Chile	7.19%	4.78%	9.85%	7.38%
Colombia	8.10%	5.67%	11.92%	9.40%
México	8.20%	5.76%	11.71%	9.20%
Perú	7.89%	5.47%	11.19%	8.69%

Es importante destacar en esta instancia que el modelo de cálculo se realizó en términos reales con valoraciones en dólares americanos de diciembre de 2022, todos los valores monetarios consignados en este trabajo se encuentran en esa base salvo indicación explícita. La tasa de costo promedio ponderado de capital utilizada es, en consecuencia, real y se optó por la variante antes de impuestos para considerar este componente de manera implícita ($WACC_{bt}$).

Costo de la Energía Eléctrica

Para el costo de la energía eléctrica se desagregó en componentes de la cadena de valor: la generación, la transmisión y la distribución. La generación eléctrica postulada es renovable y los precios utilizados

proviene de las referencias (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 2020; Renewable Energy Agency, 2022). Estos valores se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Precios de la energía renovable para diferentes países y fuentes utilizados en este estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 2020; Renewable Energy Agency, 2022)

LCOE USD/MWh	Eólico Onshore	Hidráulica Pequeña	Solar PV	Geotérmica	Biomasa	Hidráulica Grande	Ronda 2017	Ronda 2019	Ronda 2019 complementaria	Biogás	RSU
Argentina	74.1	120.7	50.7		132.6					195.1	157.7
Brasil	26.4	66.9				44.7					
Colombia								35.2	39.3		
Chile	44.0						39.7				
México	47.0		26.6	77.0							
Perú	37.4	54.5	59.7		95.6						

Tabla 4: Tarifas monómicas de transmisión y distribución en alta tensión (AT) y media tensión (MT) para los diferentes países dependiendo de su punto de conexión. Fuente: elaboración propia a partir de la información de las referencias (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022; Banco Central de la Nación, 2022; Empresa Provincial de Energía Neuquén, 2022; ENEL Chile, 2022; ENEL Colombia, 2022; Neumeier, 2022; Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, 2022a, 2022b, 2022c)

País	Tipo de conexión	Transmisión USD/MWh	Distribución USD/MWh	Total USD/MWh
Argentina	Distribución MT	8.4	21.5	29.9
	Distribución AT	8.4	8.9	17.3
	Transmisión	8.4		8.4
Brasil	Distribución MT	4.9	14.3	19.2
	Distribución AT	2.5	2.6	5.0
	Transmisión	2.5		2.5
Chile	Distribución MT	11.7	13.0	24.8
	Distribución AT	7.1	3.4	10.4
	Transmisión	7.1		7.1
Colombia	Distribución MT	12.0	56.8	68.8
	Distribución AT	12.0	38.2	50.2
	Transmisión	12.0		12.0
México	Distribución MT	14.1	27.8	41.9
	Distribución AT	6.8	27.8	34.6
	Transmisión	6.8		6.8
Perú	Distribución MT	17.1	33.1	50.2
	Distribución AT	17.1		17.1
	Transmisión	12.8		12.8

Por su parte, las tarifas utilizadas para este estudio se obtuvieron de las referencias (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022; Banco Central de la Nación, 2022; Empresa Provincial de Energía Neuquén, 2022; ENEL Chile, 2022; ENEL Colombia, 2022; Neumeier, 2022; Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, 2022a, 2022b, 2022c) y se encuentran presentados en la Tabla 4.

Otros costos de operación y mantenimiento

Para los costos de recursos humanos estimados en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021), fueron ajustados con paridad de poder de compra de cada país a partir del indicador Big Mac Index de la revista “The Economist” que puede encontrarse en la referencia (Statista, 2022).

En el caso de los costos de pérdidas, se utilizaron los niveles de pérdida de H₂, para carga, descarga y almacenamiento, postulados en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021) y valorados al costo de energía eléctrica a partir de ratios típicos de consumo de electrolizadores, es decir manteniendo un enfoque marginalista. Otros costos de menor impacto también son considerados tal cual fueron presentados en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021).

En el diagrama de la Fig. 1, se presenta el proceso de modelado, las cajas azules representan los modelos o variables adoptados de la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021) y las cajas en color naranja son las variables y modelo adaptados a la condición de cada uno de los países latinoamericanos de referencia analizados.

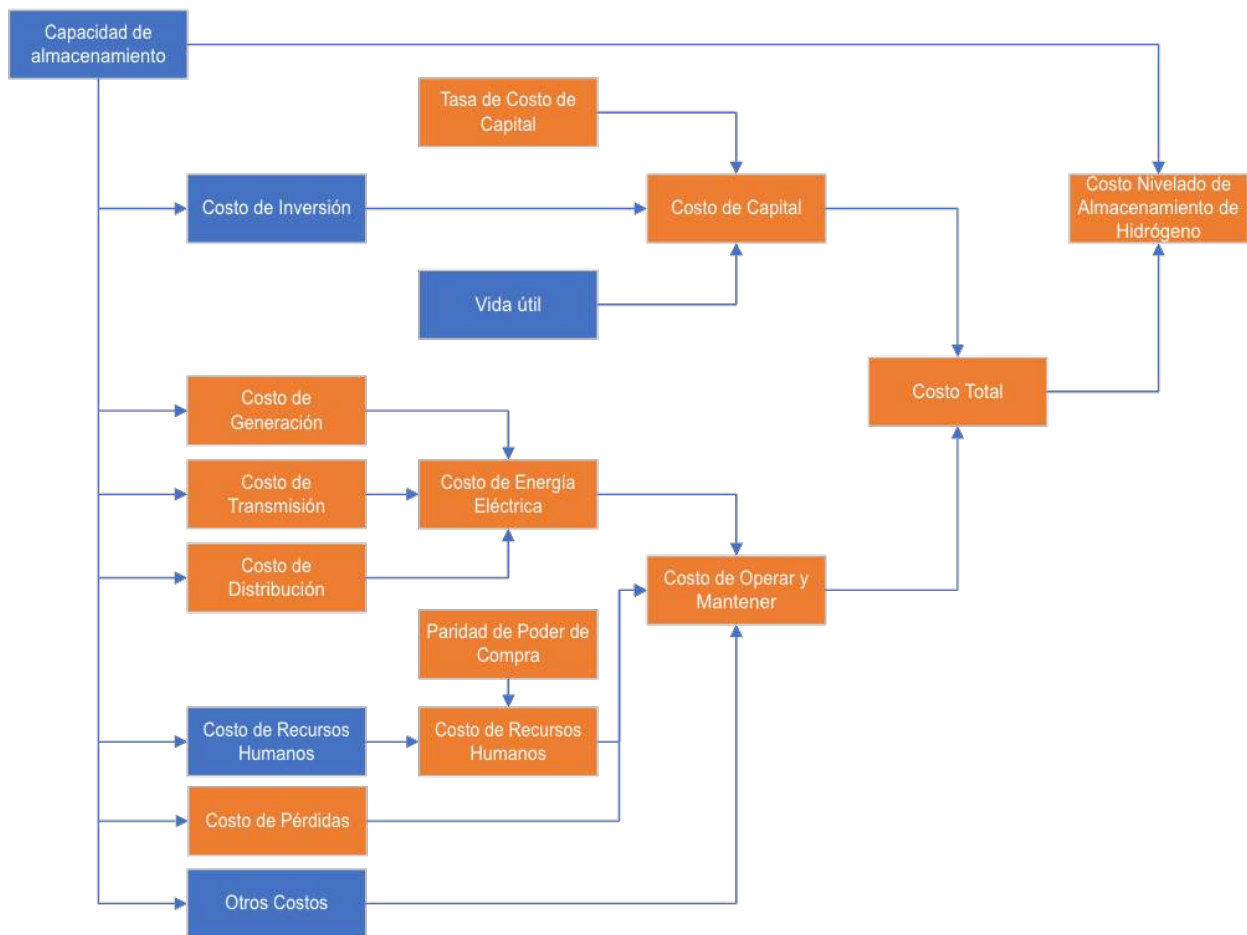


Figura 1: Flujograma del modelo de cálculo del costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno. Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Análisis comparado de escala

El primero de los resultados, presentados en la Fig. 2, es el comparado de diferentes países del costo nivelado de almacenamiento (LCHS) en cavernas de sal. Para este análisis se consideró que la energía del

almacenamiento proviene de generación eólica “OnShore” y la instalación se encuentra en el sitio de generación, con lo cual no se consideran los costos transporte y distribución eléctrica. A la izquierda se considera un período de almacenamiento anual y a la derecha un período de almacenamiento semestral.

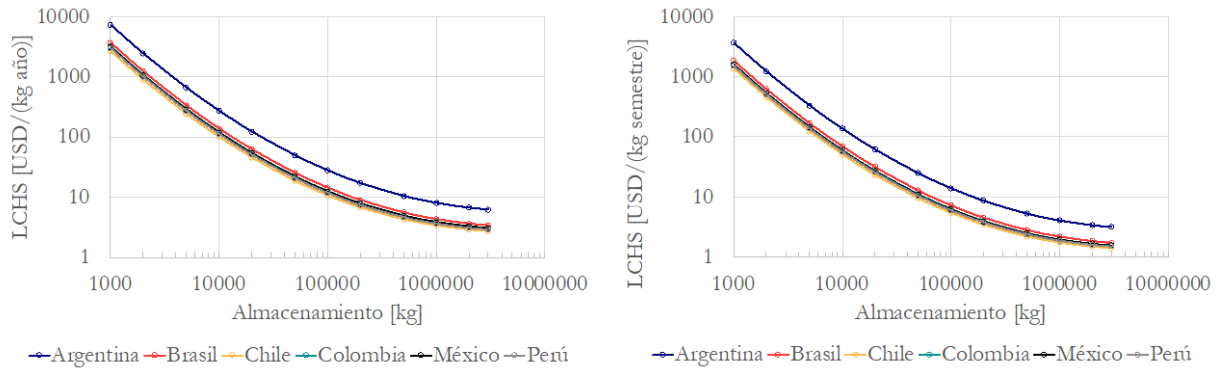


Figura 2: Costo nivelado comparado de almacenamiento de hidrógeno para caverna de sal considerando un año (izq.) y un semestre (der.) de almacenamiento. En todos los casos se considera que la energía eléctrica es de fuente eólica “on Shore” y almacenamiento en el punto de generación. (Con excepción al caso de Colombia donde se utilizan los resultados de la ronda 2019 complementaria). Fuente: elaboración propia.

Se observa que los valores de LCHS varían entre 7.363 y 2.710 USD/kg/año para Argentina y Chile respectivamente cuando la capacidad es de 1.000 kg llegando a 6.26 y 2.95 USD/kg/año para Argentina y Chile respectivamente cuando la capacidad es de 3.000.000 kg. Comportamiento análogo presenta el almacenamiento semestral.

Análogamente se presentan en la Fig. 3, para los casos de almacenamiento anual y semestral, el costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno en caverna de roca revestida.

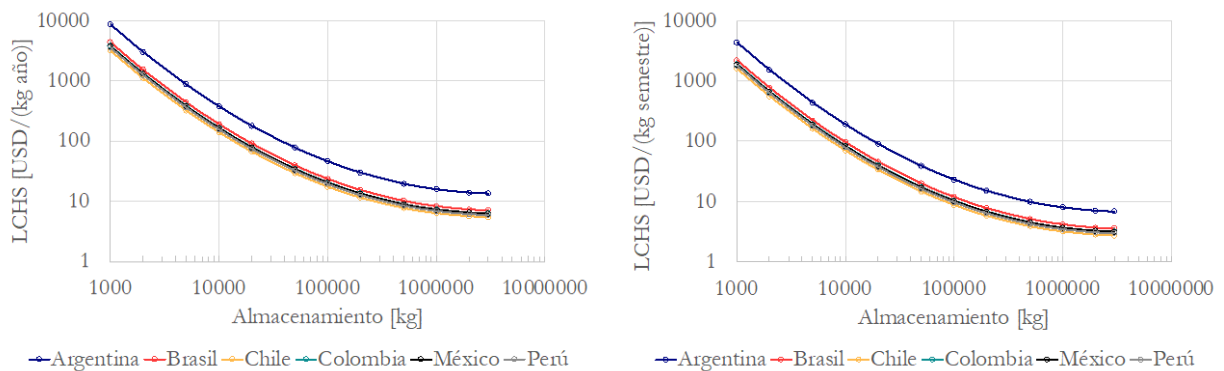


Figura 3: Costo nivelado comparado de almacenamiento de hidrógeno en roca dura revestida considerando un año (izq.) y un semestre (der.) de almacenamiento. En todos los casos se considera que la energía eléctrica es de fuente eólica “on Shore” y almacenamiento en el punto de generación (Con excepción al caso de Colombia donde se utilizan los resultados de la ronda 2019 complementaria). Fuente: elaboración propia.

En este caso se observa que los valores de LCHS varían entre 8.736 y 3.215 USD/kg/año para Argentina y Chile respectivamente cuando la capacidad es de 1000 kg llegando a 13,58 y 5,43 USD/kg/año para Argentina y Chile respectivamente cuando la capacidad es de 3.000.000 kg. Nuevamente, un comportamiento análogo presenta el almacenamiento semestral.

Componentes del Costo Nivelado

El desagregado del LCHS para el caso de 500 t de almacenamiento en caverna de sal se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5: La tabla presenta el costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno para caverna de sal con una capacidad de almacenamiento de 500 t con abastecimiento local de energía renovable. Fuente: elaboración propia

LCHS USD/kg/semestre	Costo de Capital	Energía Eléctrica	Pérdidas	Otros (Incluye RH)	Total
Argentina	4.82	0.03	0.18	0.29	5.33
Brasil	2.44	0.01	0.07	0.29	2.81
Chile	1.77	0.02	0.11	0.29	2.19
Colombia	2.11	0.02	0.10	0.29	2.51
México	2.07	0.02	0.12	0.29	2.50
Perú	1.99	0.02	0.09	0.29	2.39

Análogamente, para el caso de roca revestida, el resultado puede verse en la Tabla 6.

Tabla 6: La tabla presenta el costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno para caverna de roca revestida con una capacidad de almacenamiento de 500 t con abastecimiento local de energía renovable. Fuente: elaboración propia

LCHS USD/kg/semestre	Costo de Capital	Energía Eléctrica	Pérdidas	Otros (Incluye RH)	Total
Argentina	9.42	0.03	0.18	0.29	9.93
Brasil	4.77	0.01	0.07	0.29	5.14
Chile	3.46	0.02	0.11	0.29	3.88
Colombia	4.12	0.02	0.10	0.29	4.53
México	4.05	0.02	0.12	0.29	4.47
Perú	3.88	0.02	0.09	0.29	4.28

Dependencia con el precio de la Energía Eléctrica

Para sensibilizar la dependencia del precio de la energía eléctrica, se analizan el caso de caverna de sal con almacenamiento de 500 t en Brasil, Argentina y Perú, cómo varían el LCHS cambiando los precios de energía eléctrica entre condiciones extremas de precio de energía renovable y el impacto por el punto de conexión. Este análisis se presenta en la Tabla 7:

Tabla 7: Sensibilización del LCHS en función del precio de la energía eléctrica. Fuente: Elaboración propia

País	Generación	Conexión	Componentes LCHS USD/kg/semestre				Total
			Costo de Capital	Energía Eléctrica	Pérdidas	Recursos Humanos y otros	
Brasil	Eólico OnShore	Generación	2.44	0.01	0.07	0.29	2.81
Brasil	Pequeña Hidráulica	Distribución MT	2.44	0.04	0.21	0.29	2.98
Argentina	Eólico OnShore	Generación	4.82	0.03	0.18	0.29	5.33
Argentina	Biogás	Distribución MT	4.82	0.09	0.56	0.29	5.77
Perú	Eólico OnShore	Generación	1.99	0.02	0.09	0.29	2.39
Perú	Biomasa	Distribución MT	1.99	0.06	0.36	0.29	2.70

Se observa aquí que el impacto del precio de la energía eléctrica no solo se presenta en los consumos sino en el precio calculado de las pérdidas.

DISCUSIÓN

Lo primero que puede observarse en este estudio es que el almacenamiento de hidrógeno en cavernas es intensivo en capital, siendo los componentes de costo operativo de mucho menor importancia en la composición del *LCHS*. Esta intensidad de capital penaliza a los países que poseen un costo de capital más elevado como por ejemplo Argentina, mejorando significativamente para los casos donde el costo de capital es menor como Chile y Perú. De esta manera, el costo del capital representa proporciones de entre el 80 y 90%, seguido por los recursos humanos en valores cercanos al 5%.

Otro de los aspectos a destacar de este estudio es el comportamiento de escala del *LCHS* derivado principalmente de dos factores: la intensidad en capital y el comportamiento de la inversión. Consistente con el modelo de (Papadias & Ahluwalia, 2021) el costo de inversión cae a medida que aumenta el volumen.

A modo de contraste, si se comparan los resultados de la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021) con los casos de los países latinoamericanos referenciales, considerando costo de electricidad proveniente de energía eólica *onshore*, se obtiene lo presentado en la Tabla 8.

Tabla 8: Comparación de resultados de la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021) con el resultado de este trabajo para diversos países latinoamericanos. Fuente: elaboración propia basada en el modelo de la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021)

<i>LCHS</i> USD/kg/año	Referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021)	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	México	Perú
Caverna de Sal 100 t	18.4	28.0	14.4	10.8	12.6	12.4	11.9
Caverna de Sal 3000 t	3.7	6.3	3.4	2.7	3.1	3.1	2.9
Caverna de Roca Dura 100 t	28.7	46.3	23.7	17.5	20.6	20.3	19.4
Caverna de Roca Dura 3000 t	7.7	13.6	7.1	5.4	6.3	6.2	6.0

De esta manera, los resultados se encuentran en línea teniendo en cuenta que el autor utiliza una tasa de costo de capital de 10% y un precio de energía eléctrica 64,81 USD/MWh (57.4 USD abr 2021/MWh). Ambos valores son elevados en comparación a los que encontramos en este análisis, salvo por el caso de Argentina con un costo de capital extremadamente alto consecuencia de su riesgo país (Coutsiers et al., 2022).

CONCLUSIONES

En base al modelo de costo de inversión desarrollado en la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021) para el almacenamiento de hidrógeno comprimido en cavernas de sal o de roca dura recubierta y estimando los componentes económicos domésticos de países referenciales de Latinoamérica, se estimaron los costos nivelados de almacenamiento de hidrógeno *LCHS* a diferentes capacidades.

En este trabajo se observó que el componente de costo de capital es el más importante en el costo nivelado y representa entre un 80 y 90% del mismo.

El costo nivelado de almacenamiento en caverna de sal se reduce con la escala iniciando en valores entre 10 y 15 USD/kg/año para 100 toneladas almacenadas y llegando a niveles entre 5 y 7 USD/kg/año para 3000 t para la mayoría de los países referenciales de Latinoamérica. Valores sensiblemente superiores se

observan en Argentina (28 USD/kg/año para 100 t y 6.3 USD/kg/año para 3000 t) principalmente consecuencia de su elevado costo de capital.

Para el caso de roca dura revestida, estos valores oscilan en valores cercanos a los 30 USD/kg/año para 100 t y se reducen a valores en el rango de 6 a 7 USD/kg/año para 3000 t. Análogamente a la caverna de sal, Argentina presenta los costos nivelados más elevados de 46,3 y 13,6 para 100 y 3000 t respectivamente. Todos estos valores consideran como referencia energía eléctrica de fuente eólica local (en el caso de Colombia el precio resultante de la ronda 2019 complementaria).

Se realizó un contraste de consistencia con la referencia (Papadias & Ahluwalia, 2021) que indica razonabilidad de los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- Abdin, Z., Khalilpour, K., & Catchpole, K. (2022). Projecting the levelized cost of large-scale hydrogen storage for stationary applications. *Energy Conversion and Management*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116241>
- Agência Nacional de Energia Elétrica. (2022). *Cuadro Tarifario ANEEL*. https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/tarifa/
- Banco Central de la Nación. (2022). *Repositorio del BCN*. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29411/1/Componentes_y_determinacion_de_la_tarifa_electrica_para_los_clientes_regulados.pdf
- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2022). ESTIMACIÓN DE LA TASA DE COSTO DE CAPITAL PARA PROYECTOS DE ENERGÍA RENOVABLE EN LATINOAMÉRICA. *AVANCES EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE – AVERMA*, 26, 369–380.
- Empresa Provincial de Energía Neuquén. (2022). *Cuadro Tarifario de EPEN*. <http://www.epen.gov.ar/wp-content/uploads/2022/12/CT-JUNIO-2022.pdf>
- ENEL Chile. (2022). *Cuadro Tarifario de ENEL*. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29411/1/Componentes_y_determinacion_de_la_tarifa_electrica_para_los_clientes_regulados.pdf
- ENEL Colombia. (2022). *Cuadro Tarifario ENEL*. <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espainformacion/personas/1-17-1/2022/tarifario-junio-2022.pdf>
- Hand, E. (2023). HIDDEN HYDROGEN. *Science*, 379 (6633), 630–636. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ADH1477>.
- Lord, A. S., Kobos, P. H., & Borns, D. J. (2014). Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28), 15570–15582. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.121>
- Neumeier, M. (2022). *Tarifa de Transmisión de Energía Eléctrica en México*. <https://maerenovables.com/tarifas-transimision-2022/>
- Olaf Krunck, Fritz Crotofino, Ruth Prelicz, & Tobias Rudolph. (2013). “Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe” *Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen Status: D (4)*.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2022a). *Pliego Tarifario Electricidad*. <https://www.osinergmin.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegoTarifario?Id=150000>
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2022b). *Publicaciones de Regulación Tarifaria*. <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/publicaciones/regulacion-tarifaria>
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2022c, October). *Pliego Tarifario Cliente Final*. <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/pliegos-tarifarios/electricidad/pliegos-tarifarios-cliente-final>

- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2020). *PROCESOS COMPETITIVOS PARA EL FINANCIAMIENTO DE PROYECTOS DE ENERGÍAS RENOVABLES*. www.olade.org
- Panfilov, M. (2016). Underground and pipeline hydrogen storage. In *Compendium of Hydrogen Energy* (pp. 91–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-362-1.00004-3>
- Papadías, D. D., & Ahluwalia, R. K. (2021). Bulk storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(70), 34527–34541. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.08.028>
- Renewable Energy Agency, I. (2022). *Renewable power generation costs in 2021*. www.irena.org
- Statista. (2022, July). *Prices for a Big Mac in selected Latin American countries as of July 2022, by country (in U.S. dollars)*. <https://www.statista.com/statistics/869048/big-mac-price-index-latin-america-country/>
- Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 105, pp. 86–94). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051>

SCALE BEHAVIOR OF THE LEVELIZED COST OF COMPRESSED HYDROGEN STORAGE IN LATIN AMERICA

ABSTRACT: In this work, the levelized costs of hydrogen storage at different capacities in salt caverns and lined hard rock caverns were estimated for reference countries in Latin America. It was observed that the capital cost component is the most important in the levelized cost and represents between 80 and 90% of it. The levelized cost of storage in the salt caverns decreases with scale starting at values between 10 and 15 USD/(kg/year for 100 t stored and reaching levels between 5 and 7 USD/kg/year for 3.000 t for most of the referential countries of Latin America. Except in Argentina, which has higher values (28 USD/kg/year for 100 t and 6.3 USD/kg/year for 3000 t) as a result of its capital cost. In the case of Lined Rock Cavern, these values oscillate around 30 USD/kg/year for 100 t and decreases to the range of USD 6 to 7 USD/kg/year for 3000 t. Analog to the salt cavern, Argentina presents 46 and 13.6 USD/kg/year for 100 and 3.000 t respectively. All these values consider electricity from a local wind source (in Colombia it is the price resulting from the complementary 2019 round).

Keywords: Hydrogen Storage, Green Hydrogen, Hydrogen Value Chain, Levelized Cost of Hydrogen Storage.

IDENTIFICACIÓN DE REGÍMENES Y NÚMEROS ADIMENSIONALES EN LA FUSIÓN DE UNA GRASA ÓRGÁNICA

María del S. Vilte¹, Sonia Esteban¹, Carlos Martínez¹, Dante Domínguez²

¹Facultad de Ciencias Exactas-Universidad Nacional de Salta. INENCO.

²Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de Salta. C.P. 4400 – Salta

Tel. 0387-42554389, e-mail: mvilte88@gmail.com

RESUMEN: El propósito de este trabajo es la identificación de la escala y los regímenes básicos del proceso de fusión de un material de cambio de fase (grasa vacuna) en un recinto cerrado, calentado lateralmente con un flujo de calor constante. El análisis de la evolución temporal de la distribución de temperaturas medidas experimentalmente, en el interior de la sustancia, permite reconocer tres regímenes diferentes de transferencia de calor durante el proceso de fusión. En función de los parámetros físicos y térmicos conocidos de la sustancia se calculan los números de Prantl (Pr), Rayleigh (Ra), Stefan (Ste) y Nusselt (Nu) involucrados en las ecuaciones que describen transferencia térmica y dinámica del proceso. El orden del número de Rayleigh obtenido para las experiencias realizadas es de 10^7 . El valor calculado del número de Prantl se corresponde con el de sustancias orgánicas. Los valores obtenidos del número de Nusselt permiten explicar la interacción entre la transferencia de energía conductiva y convectiva que se establecen y predominan en las diferentes etapas de la fusión de la grasa orgánica.

Palabras clave: cambio de fase, números adimensionales, fusión, grasa orgánica, convección natural.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de cambio de fase (PCM, en inglés: Phase Change Materials) absorben o ceden energía térmica cuando alcanzan la temperatura de cambio de fase, es decir, cuando pasan por ejemplo de estado sólido a líquido o viceversa. Durante el cambio de fase la temperatura se mantiene constante y el material sigue acumulando o liberando energía. Estas características se pueden aprovechar en múltiples aplicaciones: pueden actuar como termorreguladores disminuyendo la dependencia con los sistemas de climatización, reduciendo así el consumo energético. También pueden almacenar grandes cantidades de energía térmica en forma de calor latente en volúmenes relativamente pequeños, la que se puede disponer en otro momento (Mohamed et al, 2017).

La posibilidad de acumulación de energía con materiales de cambio de fase es una perspectiva interesante para el acondicionamiento térmico de locales para diferentes usos. Las sustancias orgánicas pueden ser envasadas en recipientes de vidrio o chapa y adosarse a las paredes de los locales ya construidos o bien mezclarse, en proporciones adecuadas, con otros materiales de construcción, constituyendo las paredes del propio local (Kuznik et al. 2008; Liu y Awbi, 2009, Castell y Farid, 2014; Lee et al. 2015, Hamdan y Elwerr, 1996). El problema de la fusión de un material de cambio de fase en una cavidad rectangular calentada lateralmente ha sido ampliamente estudiado tanto experimental como numéricamente (Dhaidan Nabeel S. and Khodadadi J.M, 2015; Hamad et al, 2017; David et al, 2011). Los recintos rectangulares son una de las configuraciones geométricas más sencillas y comunes utilizadas en los sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor latente, como así también en el acondicionamiento de edificios. Por este motivo el estudio del proceso de fusión en estos materiales es fundamental, en vistas a cuantificar la energía que pueden almacenar y la disponibilidad de esta.

El propósito de este trabajo experimental es la obtención de las escalas de Pr, Ra, Ste y Nu; y la identificación de los regímenes del proceso de fusión de un PCM, en un recinto cerrado, calentado lateralmente con un flujo de calor constante; a partir de la evolución temporal de la temperatura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dispositivo Experimental

El estudio del proceso de fusión se realiza empleando modelos a escala de laboratorio que contienen el material de cambio de fase ensayado. Se construyen recintos rectangulares de altura (H), ancho (L) y profundidad (W), en vidrio de 0,003 m de espesor que se encuentran aislados térmicamente mediante una placa de 0,02 m de poliestireno expandido, excepto en la pared vertical en la que se suministra un flujo de calor constante mediante un calefactor eléctrico (superficie: $H \times W$, resistencia: 173Ω) conectado a una fuente (DC POWER SUPPLY modelo HY3003D-3). Entre la pared de vidrio del recinto y el calefactor se ubica una placa de aluminio de 0,001m de espesor a fin de homogeneizar la temperatura. En la Fig. 1(a) se muestra un esquema de la disposición de los elementos del sistema de calentamiento, el recinto que contiene el material de cambio de fase y la aislación térmica.

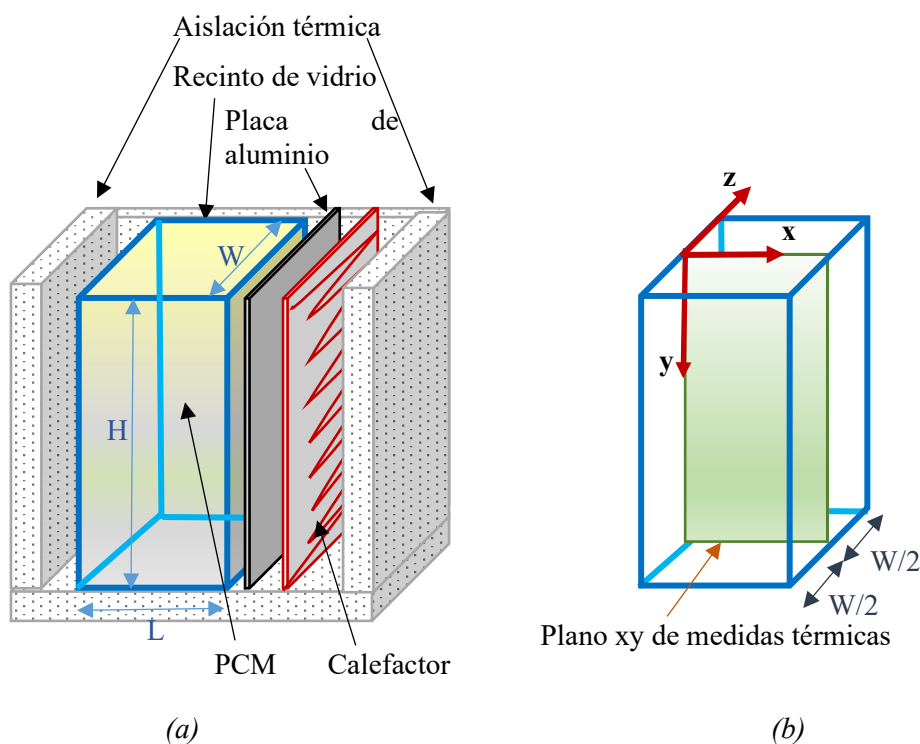


Figura 1: (a) Esquema del dispositivo experimental. (b): Plano xy de medidas térmicas

Dimensión del modelo (m ³)	Masa (kg)	Relación de aspecto (L/H)	Potencia Aplicada	Sensores en el interior del PCM, plano xy: T(x(cm),y(cm))
0,06x0,12x0,30 (LxWxH)	1,94	0,20	17,5 W	T(1, 5), T(1,10), T(1, 15), T(1,20) T(3, 5), T(3, 10), T(3, 15) T(5, 5), T(5, 10), T(5, 15)
Sensores en el centro de la superficie interna y externa de la pared calentada				T_{inca} , T_{exca}
Sensores en el centro de la superficie interna y externa de la pared fría				T_{infria} , T_{exfria}
Sensor en el centro de la superficie interna de la pared inferior o piso				T_{inpis}

Tabla 1. Información detallada sobre el recinto ensayado.

Para examinar térmicamente el proceso de fusión, se plantea un estudio de la distribución de temperaturas. En la Fig. 1(b) se muestra el plano xy, ubicado en el centro del recinto y perpendicular a la pared calentada. En este plano se ubican los sensores de temperatura. Se emplean 16 termocuplas tipo T anexadas a un equipo adquisidor de datos que consta 2 módulos ADAM 4018 (Sample Rate: 10 samples/sec; Accuracy: 0,1%) y un módulo ADAM 4520 que transforma la señal RS-485 que entrega el ADAM 4018 en RS-232, y que conectados a una PC permiten registrar y guardar los datos para el posterior procesamiento. En la tabla 1 se especifica información sobre la notación usada en el análisis de las medidas térmicas, las posiciones de las termocuplas, las dimensiones del recinto y la potencia de calentamiento aplicada. Las termocuplas fueron calibradas con un Block calibrador de aire de TECHNE modelo B-700A. En la figura 2(b) puede observarse la posición de las termocuplas en el plano xy.

Inicialmente, el recinto se encuentra con el material sólido a temperatura uniforme de laboratorio, T_o menor que la temperatura de fusión de la sustancia (T_F), ($T_o < T_F$). En el tiempo $t = 0$ s, se aplica sobre una pared vertical un flujo de calor constante (q'') mientras que la pared opuesta se mantiene a la temperatura inicial o de referencia (T_o). Las paredes restantes del recinto son adiabáticas. Como resultado del calentamiento, el PCM adyacente a la pared calentada alcanza la temperatura de fusión, dando inicio al proceso de fusión. La interfase sólido-líquido comienza a moverse alejándose de la pared caliente como se muestra en un registro fotográfico de visualización del proceso de fusión, Fig. 2(a).

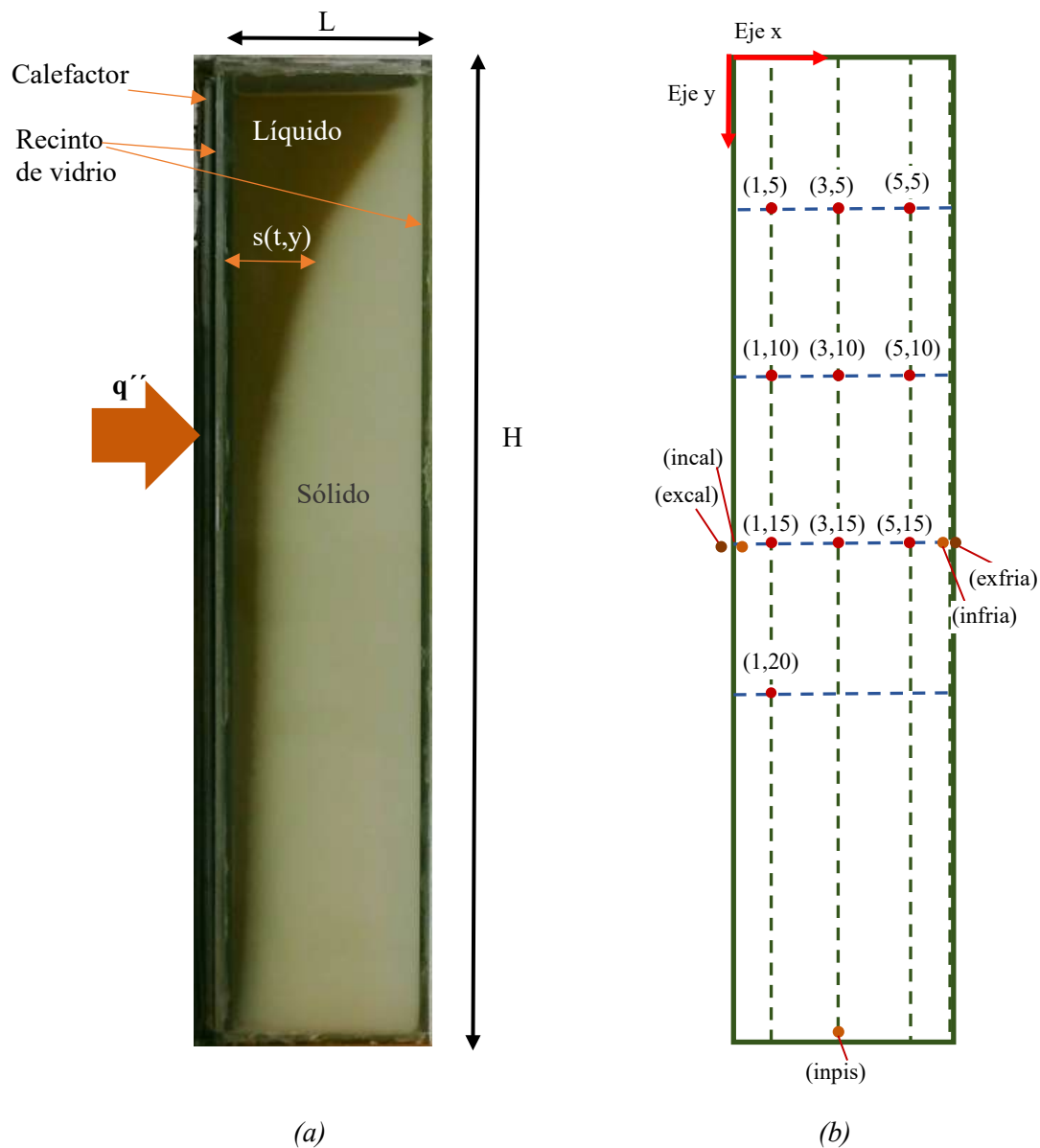


Figura 2: (a) Registro fotográfico del proceso de fusión, (b) Posición de los sensores en el plano xy.

Dada la geometría del modelo y la evolución del flujo en el tiempo, este proceso puede dividirse en tres etapas:

- Un régimen puramente conductivo donde la frontera avanza paralela a la pared calentada formando una capa de espesor constante.
- Una segunda etapa de transición del régimen conductivo al de convección natural, en la zona cercana al techo ($y \sim 0$), la frontera se desplaza más rápidamente hacia la pared opuesta dejando de ser constante el espesor de la capa líquida.
- Por último, la etapa de régimen de convección natural que comienza cuando el frente de fusión cercano al techo alcanza la pared opuesta más fría.

Estas etapas se analizan en el abordaje experimental, en base a las medidas térmicas y al análisis de los valores de los números adimensionales obtenidos. Se considera en virtud la aislación realizada que, las pérdidas de calor en las paredes del recinto son despreciables, el material es homogéneo e isotrópico y por último el flujo convectivo que se establece es bidimensional, no depende de la dirección z (Vilte, Esteban, 2014). Se considera que, durante la fusión, la transferencia de calor se realiza por conducción y por convección, se desestiman las transferencias térmicas por radiación en el sistema considerado.

Propiedades del PCM

El Código Alimentario Argentino (Ley 18.284, Decreto 2126/71) con respecto a la grasa estudiada en el Artículo 543 -(Res 2012, 19.10.84) dice: "Se entiende por Primer jugo bovino u ovino, según corresponda, el producto separado por fusión a temperatura no mayor de 80°C de los tejidos y partes adiposas limpias e inalteradas de animales bovinos (*Bos taurus*) u ovinos (*Ovis aries*). Deberá responder a las exigencias del Art 540 y a las siguientes: Índice de saponificación: 190 a 200; Índice de yodo (Wijs): 31 a 47; Insaponificable, Máximo: 1,00%; Acidez libre, Máx: 1,60 mg KOH/g (0,80% como ácido oleico); Temperatura de solidificación de ácidos grasos (título), Máxima: 46°C; Índice de peróxido, Máximo: 10,0 miliequivalente de Oxígeno/kg; Impurezas insolubles en éter de petróleo, Máx: 0,05%. Presentará color blanco-crema a amarillo pálido y sabor característico exento de olores y sabores extraños". En la figura 3(a) se muestra al aspecto de la sustancia, donde se puede apreciar el color y la textura y en la figura 3(b) una presentación comercial de la usada en todas las experiencias.

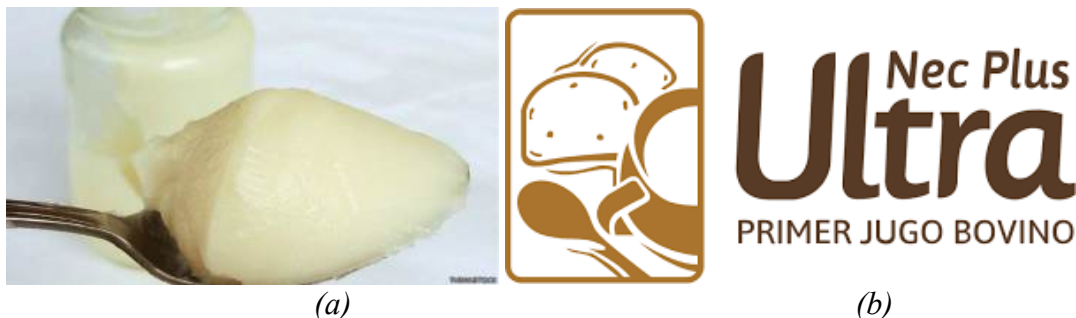


Figura 3: Sustancia de cambio de fase estudiada (primer jugo bovino). Fuente: Imagen (a): <https://www.bbc.com/mundo/noticias>. Imagen (b): <http://necplusultra.pasqualesrl.com.ar/>.

La grasa vacuna como material de cambio de fase se ha ensayado en trabajos anteriores, tanto en lo que hace al estudio del proceso de fusión de la sustancia (Vilte y Bouciguez, 2011), como así también a la caracterización de dicha sustancia (Vilte y Esteban, 2017; Lozano y Vilte, 2018). En este último aspecto en la Tabla 2 se indican algunas propiedades de dicha sustancia determinadas en forma experimental.

Temperatura de fusión (°C)	Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (kg/m s)	Difusividad térmica (m/s ²)
33°C < T _F < 38°C	0,5	891,2	5,3 × 10 ⁻³	9,4 × 10 ⁻⁸

Tabla 2. Propiedades del PCM determinadas experimentalmente.

Coefficiente de expansión volumétrica (1/K)	$1,54 \times 10^{-3}$	(Jarvis H. F., 1971)
Calor latente de fusión (J/kg)	101050	(Razali et al, 2019)
Capacidad Calorífica (J/kg K)	2900	(Razali et al, 2019)

Tabla 3. Propiedades del PCM extraídas de la bibliografía.

Por otro lado, hay algunas propiedades que se han obtenido de la bibliografía y se detallan en la Tabla 3, indicando su origen.

RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Para estudiar térmicamente y obtener imágenes del proceso de fusión de la sustancia de cambio de fase se llevan a cabo experiencias de calentamiento y enfriamiento del PCM, en un laboratorio donde la temperatura ambiente puede variar entre 16 y 20 °C. En la Fig. 4 se muestra la evolución temporal de la temperatura en distintas paredes del recinto (Tabla 2), se puede observar que la etapa de calentamiento se extiende entre seis y siete horas. La temperatura de la superficie interior del piso (T_{inpis}) se acerca a los 37°C, por lo que, en este ensayo casi toda la sustancia después de seis horas de calentamiento está prácticamente líquida.

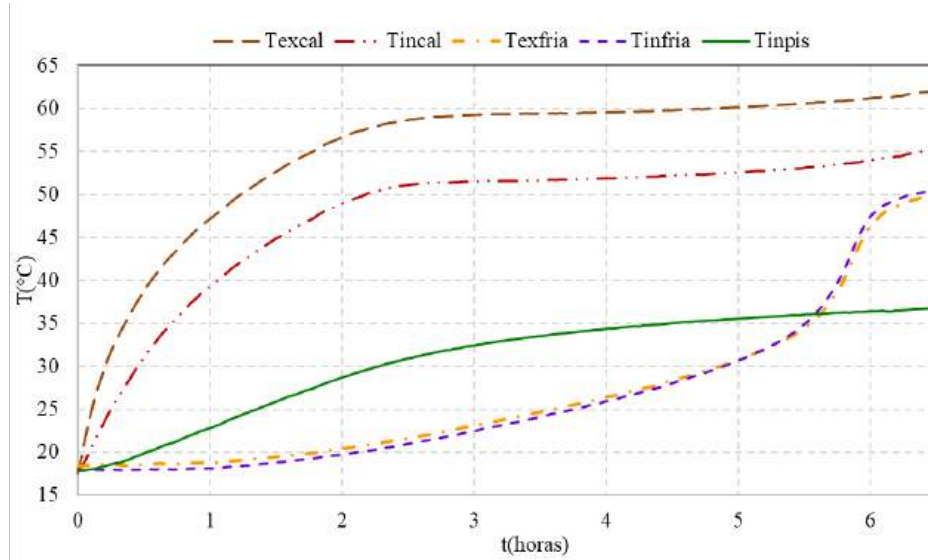


Figura 4: Evolución temporal de temperaturas en las paredes del recinto ensayado.

En las Fig. 5, 6 y 7 se presenta la evolución temporal de temperaturas verticales en el interior del recinto, para diferentes posiciones horizontales: $T(1, y)$, $T(3, y)$ y $T(5, y)$. En la etapa de calentamiento, en cada una de las gráficas, se pueden apreciar tres etapas: la primera (régimen conductivo) donde los perfiles tienen un comportamiento prácticamente lineal con el tiempo. Una vez que la sustancia se funde ($32^\circ\text{C} \leq T_F \leq 38^\circ\text{C}$) todos los perfiles experimentan un cambio de pendiente que provocan una separación de estos (segunda etapa de transición a la convección). En una tercera etapa (régimen convectivo) los perfiles continúan creciendo (más lentamente) y guardan entre sí diferencias de temperatura prácticamente constantes hasta finalizar la etapa de calentamiento. Esta etapa convectiva, tiene mayor duración cerca de la pared caliente y va disminuyendo a medida que se acerca a la pared fría. También se advierte que, al final de la etapa de calentamiento ($t \geq 6$ horas) en la región inferior ($y \geq 15$ cm) se alcanzan temperaturas superiores a 50°C, lo que da cuenta que el material de cambio de fase se encuentra en estado líquido. En las figuras 5 y 7, además de los perfiles en el interior de la sustancia se muestran los correspondiente a la pared caliente (T_{excal} , T_{inca}) y fría (T_{exfria} , T_{infria}), respectivamente. De esta

manera, se destaca la concavidad de crecimiento del perfil $T(1, y)$, en la figura 5 y de $T(5, y)$ en la figura 7.

En la Fig. 5 se puede observar que al comienzo de la experiencia (etapa conductiva), los perfiles de temperaturas cercanos a la pared caliente: $T(1, 5)$, $T(1, 10)$ y $T(1, 15)$, presentan una disminución de pendiente a medida se alejan de la pared superior. Esto se debe a que en la región superior se desarrolla más rápidamente el frente de fusión debido a la transferencia convectiva.

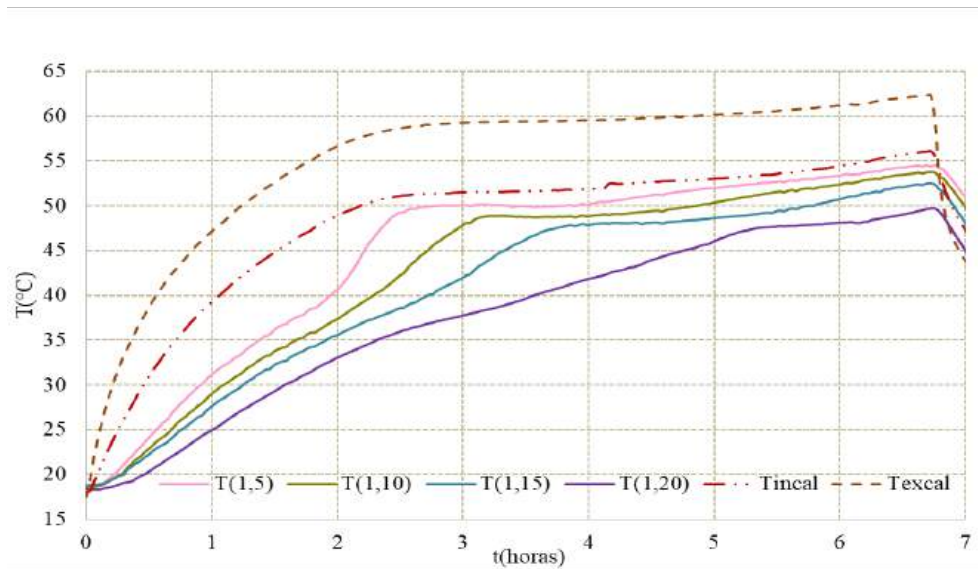


Figura 5: Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared calentada, $x=1$ cm.

La Fig. 6 muestra los perfiles de temperaturas de la región central: $T(3, y)$, se observa que al inicio del calentamiento los perfiles crecen casi linealmente, muy próximos entre sí, independientes de la variable y . En las dos primeras etapas de calentamiento (conductiva y de transición) estos perfiles son convexos, similares al observado en la pared fría: T_{infria} (Fig. 4).

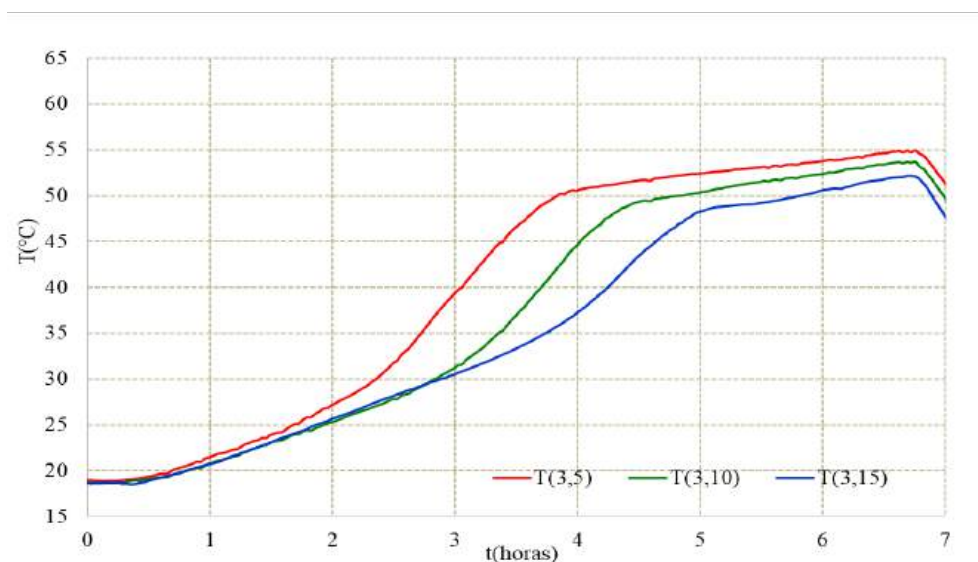


Figura 6: Evolución temporal de temperaturas en un plano vertical en el centro del recinto $x=3$ cm.

En la Fig. 7 se puede visualizar que, en la segunda etapa (de transición), se establecen grandes diferencias de temperatura. La etapa convectiva comienza cuando los tres perfiles superan los 50°C , esto ocurre a diferentes tiempos, entre cuatro y seis horas de iniciado el calentamiento.

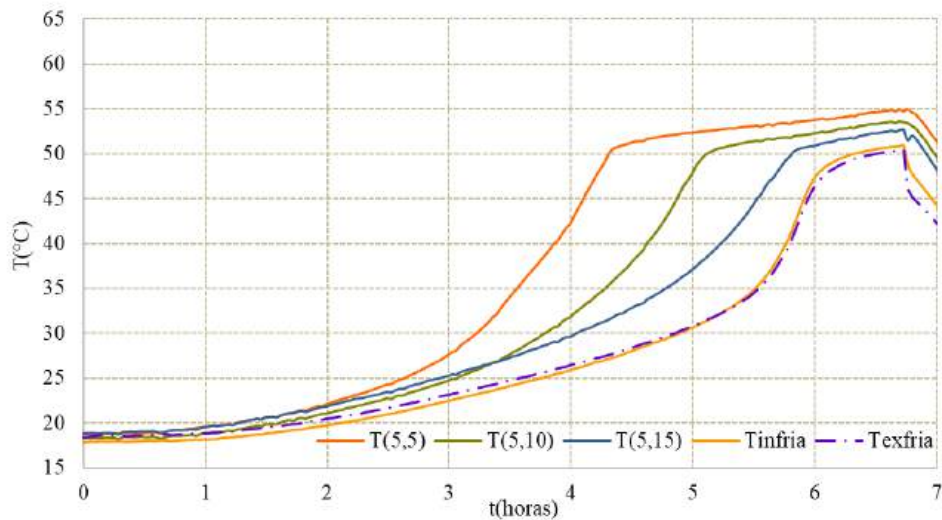


Figura 7: Evolución temporal de temperaturas, cerca de la pared fría, $x=5$ cm.

En la Fig. 8, sobre la evolución temporal de los perfiles, $T(3,10)$ y $T(3,15)$, se especifican las etapas de calentamiento y enfriamiento del PCM, como así también los tres tipos de regímenes observados: conductivo, de transición y convectivo. Además, se indica regiones donde el PCM líquido, se calienta por calor sensible. En la etapa de enfriamiento, se muestra que la sustancia presenta subenfriamiento. La experiencia de calentamiento tuvo una duración de 6,3 horas y la temperatura ambiente fue algo superior a 20°C , pero la potencia de calentamiento fue la misma que ya se indicó en la Tabla 1.

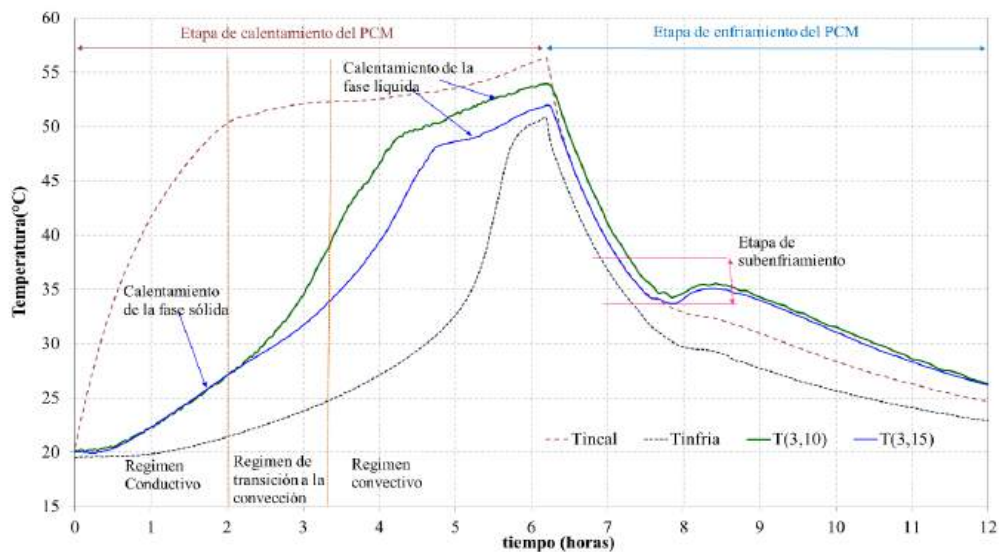


Figura 8: Evolución temporal de temperaturas en un ciclo completo de calentamiento y enfriamiento.

NÚMEROS ADIMENSIONALES QUE CARACTERIZAN EL PROCESO DE FUSIÓN DE LA SUSTANCIA ORGÁNICA

El problema de fusión en un recinto cerrado se caracteriza por los números de Prandtl (Pr), Rayleigh (Ra), Stefan (St) y la relación de aspecto del recinto, L/H (Bertrand et al, 1999). En el trabajo de Benard et al (1986) se afirma que la validez de las hipótesis asumidas en una simulación numérica depende del rango u orden de magnitud de los números adimensionales. Por otro lado, cuando se realiza un abordaje experimental, ya sea para comparar con otros estudios realizados con la misma o diferente sustancia,

con similares o diferentes condiciones iniciales y de contorno; el conocimiento del rango de los valores de los números adimensionales permite ubicar o posicionar el estudio realizado.

Número de Prantl (*Pr*)

El número de Prantl (*Pr*) permite en algún caso simplificar las ecuaciones de Navier Stokes, por ejemplo, según Zhang y Bejan (1988) en la ecuación de momentum de la capa límite térmica (líquida) se pueden desprestigiar los términos de inercia si *Pr* es mucho mayor que 1. Este número se define como el cociente entre la velocidad de difusión de la cantidad de momento (viscosidad cinemática ν) y la difusividad térmica (α):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1)$$

La viscosidad cinemática ν , la viscosidad dinámica μ y la densidad ρ de la sustancia, están relacionadas por:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

En el caso de la grasa vacuna, el valor calculado de ν con los valores de la Tabla 2 de μ y ρ determinados experimentalmente (Vilte et al, 2017) es de $5,94 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; además el valor de α indicado en la misma tabla y estimado numéricamente (Lozano y Vilte, 2018) es de $9,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Por lo tanto, el valor calculado del número de Prantl es de:

$$Pr \sim 62 \gg 1 \quad (3)$$

Según Bertrand et al. (1999) números bajos de Prantl ($Pr \sim 10^{-2}$) corresponden a la fusión de metales y números altos de Prantl ($Pr \sim 10^2$) corresponde a grasas parafinadas, por lo que el valor obtenido para la grasa orgánica está de acuerdo con los correspondientes a PCM orgánicos.

Número de Stefan (*Ste*)

Este número caracteriza la energía que la sustancia puede liberar o absorber en el proceso de cambio de fase. Se define como el cociente:

$$Ste = \frac{C\Delta T_L}{L_F} \quad (4)$$

Donde C y L_F son la capacidad calorífica y el calor latente de fusión de la sustancia respectivamente. ΔT_L es la diferencia de temperatura en el líquido, $T_L - T_F$. En el caso de la sustancia orgánica estudiada, la fusión del material se lleva a cabo con la aplicación de un flujo de calor constante por lo que la temperatura de la fase líquida T_L se incrementa con el tiempo, por lo tanto ΔT_L es una función del tiempo. Los valores de C y L_F empleados son los consignados en la Tabla 3.

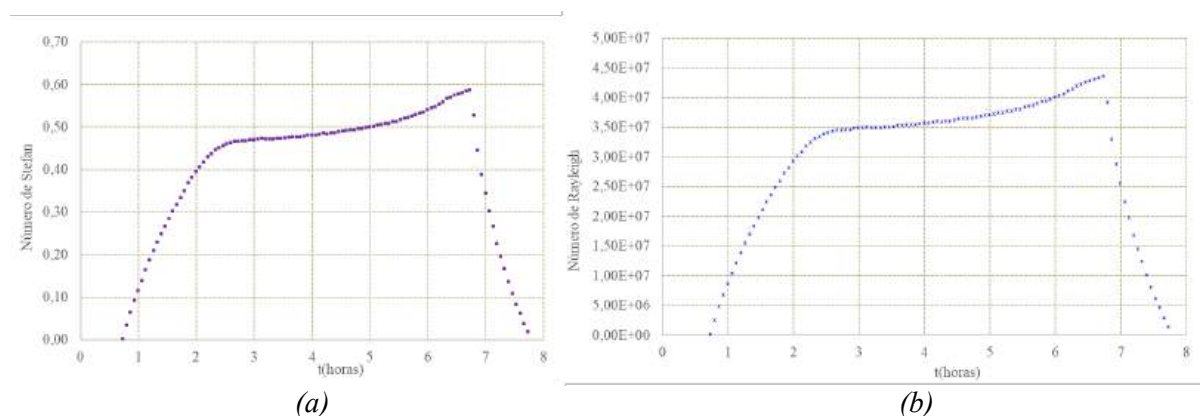


Figura 9: Evolución temporal, (a) del Número de Stefan, (b) del Número de Rayleigh.

En las Fig. 9(a) se muestra el número de Stefan en los diferentes regímenes que se establecen durante el proceso de fusión. Cabe aclarar que en la diferencia ΔT_L , se considera T_L , temperatura de la fase líquida, igual al valor de T_{inca} , la temperatura de la pared calentada en contacto con la sustancia de cambio de fase. De esta manera valores positivos del número de Stefan se obtienen a partir de $t=0,7$ horas cuando T_{inca} supera a T_F . El valor del número de Stefan calculado en las etapas de transición a la convección y convección pura según la Fig. 9(a) varía entre:

$$0,4 \leq Ste \leq 0,6 \quad (5)$$

De acuerdo con Zhang y Bejan (1989) se puede determinar un número de Ste^* independiente del tiempo, basado en q'' que es el flujo de calor constante que ingresa al recinto.

$$Ste^* = \frac{Cq''H^*}{kL_F} \quad (6)$$

Donde k es la conductividad térmica de la sustancia orgánica, el valor empleado es el indicado en la Tabla 2, que se obtuvo mediante un método numérico (Lozano y Vilde, 2018). Siguiendo un trabajo de Fadl y Heames (2019) para el cálculo de números adimensionales para el proceso de fusión en cavidades cerradas, H^* es una longitud característica definida por:

$$H^* = \frac{H \cdot L}{2(H + L)} \quad (7)$$

El valor de q'' , se determina en base a la potencia disipada en el área de la pared calentada:

$$q'' = \frac{V \cdot I}{A} \quad (8)$$

Donde $A = H \times W$. De esta forma aplicando la Ec. (6) se obtiene un valor de $Ste^* = 1,2$. Este valor resulta mayor que el obtenido mediante la Ec. (4), por lo que puede considerarse una cota superior para el número de Stefan.

Número de Rayleigh (Ra)

Del trabajo de Jany y Bejan (1988) se sabe que, para números de $Pr > 1$, las diferentes escalas de tiempo y tasas de transferencia de calor se pueden expresar en términos de leyes de potencia del número de Rayleigh. Para evaluar estas relaciones, un primer paso es el conocimiento del valor u orden de magnitud del Rayleigh definido por:

$$Ra = \frac{g\beta(T_L - T_F)H^{*3}}{\alpha\nu} \quad (9)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y β es el coeficiente de expansión volumétrica de la sustancia. Como ya se dijo antes, la expresión ΔT_L es una función de tiempo y valores positivos del número de Rayleigh se obtienen a partir de $t = 0,7$ horas cuando T_{inca} supera a T_F . En la Fig. 9(b) se muestra el número de Rayleigh en los diferentes regímenes que se establecen durante el proceso de fusión. El valor del número de Rayleigh calculado en las etapas de transición a la convección y predominantemente convectiva varía entre:

$$3 \times 10^7 \leq Ra \leq 4,5 \times 10^7 \quad (11)$$

Nuevamente siguiendo a Zhang y Bejan (1989), se puede estimar un Ra^* independiente del tiempo, basado en el flujo de calor q'' , cuya expresión es:

$$Ra^* = \frac{g\beta H^4 q''}{\alpha \nu k} \quad (12)$$

De esta manera se obtiene un $Ra^* = 2,17 \times 10^7$. Si bien este valor es del orden del Rayleigh calculado en las etapas de transición a la convección y predominantemente convectivo (Ec. 1), se ubica al final de la etapa conductiva (Fig. 8) alrededor de 1,5 horas de iniciado el calentamiento (Fig. 9(a)).

Número de Nusselt (Nu)

El número de Nusselt en la pared caliente se determina con la expresión:

$$Nu = \frac{q'' H}{k(T_{inca} - T_F)} \quad (13)$$

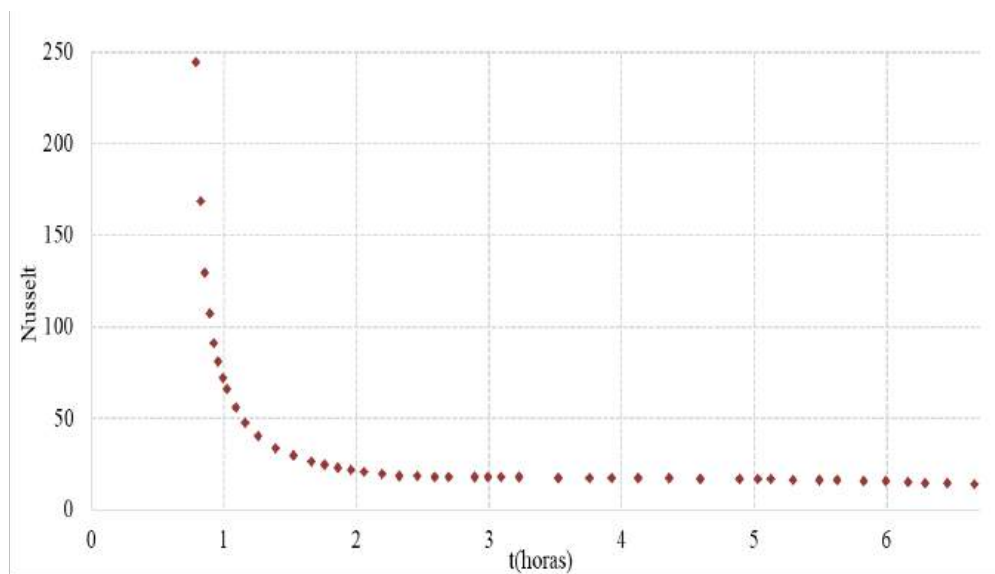


Figura 10: Evolución temporal del número de Nusselt en pared calentada del recinto.

En la Fig. 10 se muestra la variación temporal del número de Nusselt. Como ya se ha indicado anteriormente la temperatura inicial de la muestra T_0 es menor que T_F al inicio del calentamiento, por lo que Nu solo tiene sentido cuando $T_{inca} \geq T_F$, esto ocurre en los ensayos a partir de $t \sim 0,7$ horas. En la primera etapa del proceso de fusión, la conducción pura es el mecanismo dominante de transferencia de calor. La interfase se mueve paralela a la pared caliente, y la evolución temporal del frente de fusión viene dada por la solución clásica del problema de Stefan: $s(t,y) \sim \sqrt{t}$ (Alexiades y Solomon, 1993), por lo que el número de Nusselt disminuye como $1/\sqrt{t}$ (Bertrand et al, 1999). Luego, a medida que el espesor de la capa líquida crece con el tiempo, la influencia de la convección en la transferencia de calor se impone en la parte superior del recinto y progresivamente a lo largo de toda la interfase. En este régimen de transición, se establece una competencia entre la transferencia por conducción pura y la transferencia por convección natural lo que limita la disminución del número de Nusselt, que pasa por un mínimo y luego aumenta cuando el régimen de transferencia de calor está dominado por la convección (Zhang y Bejan, 1989). En el caso estudiado en este trabajo no se observa el mínimo mencionado, por lo demás coincide con lo expuesto en los trabajos citados. Finalmente, las capas límite en el líquido se separan y la transferencia de calor promedio alcanza un valor constante.

CONCLUSIONES

El análisis de la evolución temporal de la distribución de temperaturas permite identificar las distintas regímenes y etapas del proceso de fusión de una grasa orgánica. En la etapa de enfriamiento, se observa

el fenómeno de subenfriamiento. Este fenómeno permite identificar para cada ensayo la temperatura de solidificación de la sustancia, que como no es pura no coincide exactamente con la fusión, pero se encuentra en un intervalo alrededor de ella.

El valor del número de Prantl obtenido (Ec. 4) permite identificar la sustancia como un compuesto orgánico ($Pr = 62 > 1$). Para las experiencias realizadas con esta grasa vacuna los números de Stefan varían entre $0,1 \leq Ste \leq 1,5$. El orden del número de Rayleigh obtenido para las experiencias realizadas es de 10^7 . El número de Nusselt permite analizar la competencia entre la transferencia conductiva y la convectiva presentes en el proceso de fusión.

Con respecto al PCM estudiado, la grasa vacuna, hay estudios actuales sobre su aplicación como parte de un sistema de refrigeración pasiva de paneles fotovoltaicos (Karami et al, 2021), en este sentido el agregado de otras sustancias al jugo bovino, permiten mejorar las propiedades térmicas involucradas en la transferencia de energía (Razali et al, 2019). Estos estudios ponen de manifiesto la relevancia del estudio del proceso de fusión de esta sustancia.

En vistas a la simulación del proceso, se pretende realizar un análisis más profundo de los parámetros pertinentes y de las leyes de escala del problema considerado, para mostrar si fuera posible que las diferentes escalas de tiempo y rapidez de transferencia de calor se pueden expresar en términos de leyes de potencia de los números de Rayleigh, Stefan o Prantl.

REFERENCIAS

- Alexiades, V. y Solomon, A. *Mathematical Modelling of Melting or Freezing Processes*. Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group, 1993.
- Benard C., Gobin D. y Zanolli A. (1985). Moving boundary problem: heat conduction in the solid phase of a phase-change material during melting driven by natural convection in the liquid. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 29, N° 11, pp. 1669-168.
- Bertrand O., Binet B., Combeau H., Couturier S., Delannoy Y., Gobin D., Lacroix M., Le Quéré P., Médale M., Mencinger J., Sadat H. y Vieira G. (1999). Melting driven by natural convection a comparison exercise: first results, *Int. J. Therm. Sci.* 38 (1) 5–26.
- Castell A. y Farid M. (2014). Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively, *Energy Build.* 81, 59-71.
- David D., Kuznik F. y Roux J. (2011). Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behavior of a phase change material wall. *Applied Thermal Engineering* 31, 3117-3124. Available online www.sciencedirect.com.
- Dhaidan N. y Khodadadi J. (2015). Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, 449–477.
- Fadl M. y Eames P. (2019). An experimental investigation of the melting of RT44HC inside a horizontal rectangular test cell subject to uniform wall heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume 140, pp. 731-742.
- Farid M., Khudhair A., Razack S. y Al-Hallaj S. (2004). Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* 45, 1597 – 1615.
- Hamad F., Egelle E., Cummings K. y Russell P. (2017). Investigation of the melting process of polyethylene glycol 1500 (PEG 1500) in a rectangular enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114, pp.1234–1247.
- Hamdan M. y Elwerr F. (1996). Thermal energy storage using a phase change material. *Solar Energy* Vol. 56, No. 2, pp. 183-189.
- Jany P. y Bejan A. (1988). Scaling theory of melting with natural convection in an enclosure. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 31, No. 6, pp. 1221-1235. Pergamon Press.
- Jarvis H. (1971). *Environmental Science*. *International Journal of Food Science and Technology*. Vol. 6, Edition 4, pp. 383-391.
- Karami B., Azimi N. y Ahmadi S. (2021). Increasing the electrical efficiency and thermal management of a photovoltaic module using expanded graphite (EG)/paraffin-beef tallow-coconut oil composite as phase change material. *Renewable Energy* 178, 25-49.

- Lee K., Medina M., Raith E. y Sun X. (2015). Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management, *Appl. Energy* 137, 699-706.
- Liu H. y Awbi H. (2009). Performance of phase change material boards under natural convection. *Build. Environ.* 44 (91788-1793).
- Lozano F. y Vilte M. (2018). Estimación de parámetros Térmicos de una grasa por un método de solución de problema inverso. *Mecánica Computacional Vol XXXVI*, págs. 2159-2167.
- Mohamed S., Al-Sulaimana F., Ibrahima N., Zahira Md. H., Al-Ahmeda A., Saidura R., Yılbaş B. y Sahina A. (2017). A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renewable Energy* 107, 1072–1089.
- Razali T., Muhammad A. y Hamdani U. (2019). Thermal Properties of Beef Tallow/Coconut Oil Bio PCM Using T-History Method for Wall Building Applications. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*. Vol. 4, No. 11.
- Vilte M. y Bouciguez A. (2011). Estudio experimental de la convección natural en un proceso de fusión de grasas orgánicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15*, 3, 33-40. ISSN 0329-5184.
- Vilte M. y Esteban S. (2014). Análisis de la distribución de temperaturas en una sustancia que experimenta un proceso de fusión. *Acta de la XXXVII. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 2, pp. 03.99-03.108.
- Vilte M., Esteban S. y Toro M. (2017). Caracterización de una sustancia orgánica: determinación de propiedades físicas y térmicas. *Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 5*, pp. 03.41-03.47, 2017. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Zhang Z. y Bejan A. (1989). Melting in an enclosure heated at constant International Journal of Heat Mass Transfer. Vol. 32. No. 6, pp. 1063-1076.

IDENTIFICATION OF REGIMES AND DIMENSIONAL NUMBERS IN THE MELTING OF AN ORGANIC FAT

ABSTRACT: The purpose of this work is the identification of the scale and basic regimes of the melting process of a phase change material (beef fat) in a closed enclosure, heated laterally with a constant heat flow. The analysis of the temporal evolution of the experimentally measured temperatures distribution inside the substance allow to recognize three different heat transfer regimes during the fusion process. Depending on the known physical and thermal parameters of the substance, the Prantl (Pr), Rayleigh (Ra), Stefan (Ste) and Nusselt (Nu) numbers involved in the equations that describe thermal transfer and dynamics of the process are calculated. The order of the Rayleigh number obtained for the experiments carried out is 10^7 . The calculated value of the Prantl number corresponds to that of organic substances. The values obtained from the Nusselt number allow us to explain the interaction between the conductive and convective energy transfer that are established and predominate in the different stages of the fusion of organic fat.

Keywords: phase change, dimensionless numbers, fusion, organic fat, natural convection.

EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE MÁS ADECUADOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CALOR DE UN COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE

F. López¹ y A. Hernández¹

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
 Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa)

Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.

Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489 e-mail: fabio.lopez@exa.unsa.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta una metodología para evaluar los PCM (materiales de cambio de fase) más adecuados para calentadores solares de aire utilizando métodos de toma de decisiones de múltiples criterios (MCDM). Específicamente, se combinan los métodos TOPSIS y AHP para clasificar los materiales en función del costo, el calor latente, la conductividad térmica y el calor específico. Se evaluaron PCM disponibles localmente y comerciales con puntos de fusión en el rango 20-70°C. El método AHP determinó los pesos para cada criterio que se utilizaron en el análisis TOPSIS. Los resultados mostraron que la grasa vacuna obtuvo la puntuación más alta, seguida por la cera de soja, la parafina, la estearina y luego dos parafinas comercializadas por Rubitherm. Un análisis de sensibilidad verificó la solidez de la clasificación. El estudio demuestra una metodología efectiva para seleccionar PCM óptimos para aplicaciones térmicas solares utilizando múltiples criterios relevantes.

Palabras clave: Materiales de cambio de fase, Colector solar calentador de aire, Eficiencia térmica, Análisis TOPSIS y AHP.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de cambio de fase (PCM) son ampliamente utilizados en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica debido a su alta densidad energética (Aftab et al., 2021). En particular, en sistemas de calefacción solar de aire, donde su uso puede mejorar significativamente el rendimiento y la eficiencia térmica (Tyagi et al., 2012). Sin embargo, la selección adecuada de los PCM desempeña un papel fundamental para lograr dicha mejora. La figura 1 muestra un esquema que ilustra cómo se incorporan los materiales de cambio de fase con colectores solares calentadores de aire para el calefacción edilicio.

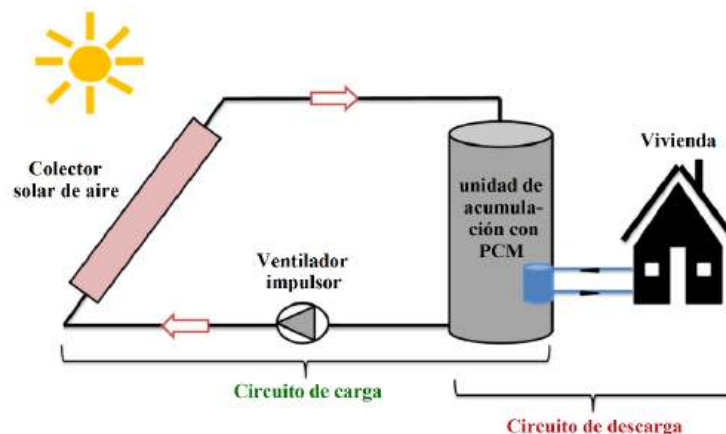


Figura 1. Esquema de un sistema de calefacción solar de aire con tecnología PCM.

El enfoque convencional para la selección de PCM en sistemas de calefacción solar de aire se basa en la experiencia del ingeniero a cargo y/o en la disponibilidad de materiales. Estudios recientes han demostrado que este enfoque no aborda explícitamente los objetivos del sistema ni considera las elecciones subjetivas de los ingenieros (Karami, 2011). Para superar este desafío, la combinación de la Técnica de orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS) y el Proceso de jerarquía analítica (AHP) se propone como un enfoque más efectivo (Xu et al., 2017). Esta combinación de métodos puede generar resultados más alineados con las decisiones del mundo real (Karim y Karmaker, 2016). Los métodos, TOPSIS y AHP, pertenecen a la categoría de métodos de toma de decisiones con múltiples criterios (MDCM), que han surgido como una herramienta prometedora para identificar los PCM más adecuados para una aplicación determinada Hwang y Yoon (1985) y Thomas L. Saaty (1980).

En el proceso de selección, es crucial elegir las propiedades más representativas del problema a resolver. En este sentido, Ehid y Fleischer (2012) recomienda que se debería considerar: costo, conductividad térmica, tanto en la fase líquida como sólida, capacidad de almacenamiento y temperatura de cambio de fase como propiedades en la elección del PCM más apropiado. Yinping et al., (2007); Zhou et al., (2007); (Waqas y Kumar, 2011) sugieren utilizar PCM con una temperatura de cambio de fase 20 °C y 32 °C si el objetivo del material es el calefacción de viviendas. Además, Jurinak y Abdel (1978) que estudiaron un sistema de calefacción solar de aire con una unidad de almacenamiento de energía con PCM y sugieren que la selección de un PCM debe basarse en su punto de fusión y no en su calor latente.

En este contexto, este estudio investiga el uso de los métodos AHP y TOPSIS en el proceso de selección de sustancias de cambio de fase con punto de fusión en el rango de temperatura de salida esperado para calentadores solares de aire con fines de calefacción edilicia (de 20 a 70 °C). Se evalúa la viabilidad de diferentes materiales ofrecidos tanto localmente en la provincia de Salta como materiales ofrecidos por la compañía alemana Rubitherm. La compañía Rubitherm es una empresa alemana que comercializa PCM para diversas aplicaciones, con precios que oscilan entre 22287 y 24844 ARS/kg.

Los métodos AHP y TOPSIS son adecuados para el estudio presentado porque permiten evaluar y seleccionar los materiales de cambio de fase (PCM) más apropiados para aplicaciones solares térmicas, considerando múltiples criterios relevantes al problema. El método AHP ayuda a determinar los pesos de importancia de cada criterio, mientras que el método TOPSIS ayuda a clasificar los materiales según su cercanía a la solución ideal.

El artículo se organiza de la siguiente manera. Primero, se describe la metodología seguida. Donde se realiza un listado de los materiales PCM disponibles, se identifican las sustancias potencialmente elegibles bajo ciertas restricciones. Mediante el uso combinado de los métodos TOPSIS y AHP se identifican las sustancias PCM más adecuadas de acuerdo a las propiedades más relevantes al problema de la acumulación de calor. Seguido se presentan los resultados de la selección realizada. Luego, se presenta un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados de la selección. Se realiza un análisis y discusión sobre los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan algunas conclusiones.

METODOLOGIA

El proceso de selección se inicia mediante la determinación del objetivo final asignado al material en cuestión. Se lleva a cabo una caracterización y pre-selección de las sustancias en función de sus propiedades termo-físicas. Se realiza un filtrado de las propiedades más relevantes al problema de la acumulación de calor y se determina su importancia relativa mediante el método AHP. A continuación, estos resultados se utilizan en el método TOPSIS para clasificar los PCM según sus puntajes de desempeño. Por último, a través del uso de ambos métodos se realiza un análisis de sensibilidad.

Establecimiento del objetivo final del PCM

El objetivo principal es obtener PCM que operen a la salida de un colector solar calentador de aire típico para la calefacción de viviendas. Entonces, se establece la restricción de conseguir materiales con temperaturas de fusión dentro del rango 20 a 70 °C y temperaturas de solidificación dentro o superiores al rango de 20 a 32 °C, según lo recomendado por Yinping et al. (2007), Zhou et al. (2007) y Waqas y Kumar (2011).

Caracterización de los PCM

Los PCM se caracterizan utilizando información de las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes. Se recopila información técnica de las temperaturas de cambio de fase, el costo, el calor latente de fusión, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico, las cuales se organizan en tablas.

Pre-selección del PCM de la base de datos

Se realiza una pre-selección de los PCM a partir de la base de datos creada, eligiendo aquellos que cumplan con las restricciones impuestas.

Determinación de las propiedades más relevantes

Se determinan las propiedades termo-físicas más relevantes al problema de la acumulación de calor por cambio de fase. En este trabajo, las propiedades del costo, el calor latente, la conductividad térmica y el calor específico se escogieron como las propiedades más relevantes.

Determinación de los pesos iniciales con el método AHP

El método AHP (Analytic Hierarchy Process) es un enfoque multi-criterio para la toma de decisiones. Esta técnica integra los procesos de calificación para encontrar las alternativas más relevantes. La selección se realiza con respecto a un objetivo general, que se desglosa en un conjunto de criterios. La metodología consiste en establecer los pesos de importancia de estos criterios, esto se hace al comparar los mismos de a pares. El método también permite verificar la consistencia de los juicios emitidos en las comparaciones, a través del cálculo del índice de consistencia.

Para seguir este método se realizan los siguientes pasos:

1. Construcción de la matriz de comparación por pares

Se establece una matriz cuadrada, A , de tamaño $n \times n$, donde n es el número de elementos a comparar.

Se asignan los valores de importancia relativa para cada par de elementos en la matriz A , basados en la escala de comparación de 1-9, donde 1 representa la misma importancia y 9 la importancia extrema. La diagonal principal de la matriz se llena con unos, ya que representa la comparación de cada elemento consigo mismo.

La matriz de comparación por pares representa los juicios realizados sobre la importancia relativa entre cada par de criterios o alternativas en forma estructurada.

2. Normalización de la matriz

Se calculan las ponderaciones de cada criterio utilizando el método del vector propio. Se obtiene una matriz normalizada, A' , donde cada elemento a'_{ij} representa la relación de importancia relativa normalizada entre los elementos i y j . La ecuación para la normalización es:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

La matriz normalizada permite obtener los pesos relativos de cada elemento. Esto hace los juicios comparables entre sí.

3. Cálculo de los pesos relativos

Para obtener los pesos relativos de los criterios se suman los elementos de cada columna de la matriz A' y se dividen por la suma total para obtener los pesos normalizados.

La ecuación para este cálculo es:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a'_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a'_{ij}}$$

Los pesos relativos permiten obtener las prioridades de cada criterio o alternativa, basado en los juicios de importancia provistos en las comparaciones.

4. Verificación de la consistencia

Se calcula el índice de consistencia (*IC*) y el índice de consistencia aleatoria (*IR*) para evaluar la consistencia de las comparaciones.

Para obtener el *IR* se divide la diferencia entre el valor propio máximo λ_{max} y el tamaño de la matriz n .

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Se utiliza un valor predefinido de *IR* basado en el tamaño de la matriz que se calcula de la siguiente manera:

$$IR = \frac{n - 1}{2}$$

Los índices *IC* e *IR* son indicadores que se utilizan en el método AHP para evaluar la consistencia de los juicios emitidos en las comparaciones por pares.

Se calcula el cociente de consistencia (*CR*) dividiendo el *IC* por el *IR*.

$$CR = \frac{IC}{IR} = \frac{2 * \lambda_{max}}{(n - 1)^2}$$

El índice de consistencia mide el grado de consistencia inherente en las comparaciones por pares realizadas entre los criterios o alternativas. Se calcula a partir de los valores propios de la matriz de comparación. Si el *CR* es superior a 0.1, la matriz se considera inconsistente.

Implementación del método TOPSIS

El método TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) es un método de análisis de decisiones múltiples criterios, que se basa en el concepto de que la alternativa seleccionada debe tener la distancia geométrica más corta desde la solución ideal positiva y la distancia geométrica más larga desde la solución ideal negativa. Esto permite una clasificación objetiva de las alternativas (materiales de cambio de cambio de fase, en este caso).

El método TOPSIS se basa en los siguientes pasos:

1. Construcción de la matriz de decisión

Se comienza construyendo la matriz de decisión D con los datos de las alternativas (filas) y los criterios considerados (columnas). La matriz de decisión representa los datos del problema de forma organizada, con cada alternativa evaluada en cada criterio. Permite ver toda la información de manera compacta.

2. Normalización de la matriz de decisión

La fórmula para la normalización del valor (i, j) en la matriz de decisión D es:

$$R_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n D_{ij}^2}} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y } j = 1, 2, \dots, m$$

donde n es el número de alternativas y m es el número de criterios.

Se normaliza la matriz para hacer los valores comparables y adimensionales. Esto es necesario ya que cada criterio posee unidades de medida diferentes. La normalización lleva todos los valores a una escala común.

3. Construcción de las matrices de decisión ponderadas

La fórmula para la construcción de la matriz de decisión ponderada (V) a partir de la matriz de decisión normalizada (R) y los pesos de los criterios (W) es:

$$V_{ij} = R_{ij} \times W_j$$

donde W_j es el peso calculado con el método AHP del criterio j .

Las ponderaciones de los criterios muestran la importancia relativa de cada uno de ellos en la decisión. Criterios más importantes tendrán pesos más altos.

4. Determinación de la solución ideal y la solución anti-ideal

Se calcula la solución ideal (C^+) y la solución anti-ideal (C^-) en función de los valores máximos y mínimos en cada columna de la matriz de decisión ponderada (V). La fórmula para la solución ideal (C^+) y la solución anti-ideal (C^-), donde m es el número de criterios, es:

$$C_j^+ = \max(V_{ij}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y } j = 1, 2, \dots, m$$

$$C_j^- = \min(V_{ij}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y } j = 1, 2, \dots, m$$

Las soluciones ideal y anti-ideal representan los mejores y peores escenarios posibles respectivamente. Estas sirven como puntos de referencia para evaluar las alternativas.

5. Cálculo de la distancia a la solución ideal y la solución anti-ideal

Se calcula la distancia euclidiana entre cada alternativa y la solución ideal y la solución anti-ideal. La fórmula para la distancia a la solución ideal (D_i^+) y la distancia a la solución anti-ideal (D_i^-), donde n es el número de alternativas y m es el número de criterios, es:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - C_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - C_j^-)^2}$$

Se calcula la distancia euclidiana de cada alternativa a la ideal y anti-ideal para medir qué tan cerca o qué tan lejos está de estos escenarios extremos. Esto permite determinar el coeficiente de proximidad.

6. Cálculo del coeficiente de proximidad

Se calcula el coeficiente de proximidad relativo a cada alternativa:

$$P_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

La puntuación de proximidad relativa representa la cercanía relativa de una alternativa a la solución ideal.

7. Clasificación de las alternativas

Las alternativas se clasifican de acuerdo al valor P_i . Cuanto más cercana a 1 sea la puntuación, mejor será la alternativa (la mejor alternativa elegida no solo tiene la distancia más corta desde la solución

ideal positiva, sino también la distancia más larga desde la solución ideal negativa (Arroyo-Cañada & Gil-Lafuente, 2019).

Los métodos AHP y TOPSIS son adecuados para el estudio realizado debido a que ambos métodos han sido ampliamente utilizados y validados para problemas de selección multi-criterio (Shukla, Agarwal, Rana y Purohit (2017); Yadav, Joseph y Jigeesh (2018)). Además, no requieren información probabilística de los datos analizados, por lo que son adecuados cuando se dispone solo de información determinística de las alternativas.

Aplicación del análisis de sensibilidad

En este análisis se varían las valoraciones de los criterios introducidas en el método AHP (aumentando o disminuyendo los valores de cada criterio en un 10% aproximadamente) y se observa cómo cambia la clasificación TOPSIS. Este análisis ayuda a identificar los criterios más importantes y las entradas de datos más sensibles que tienen el mayor impacto en la clasificación final.

MATERIAL E INFORMACIÓN RECOPIADA

Después de investigar sobre los PCM disponibles localmente, se identificaron varias sustancias como potenciales acumuladoras de calor. Estas incluyen aceite de coco, grasa vacuna, cera de soja, estearina y parafina, todas ellas de pureza industrial. Además, se seleccionaron dos PCM de pureza analítica, denominados RT 25 HC y RT 28 HC, suministrados por la compañía Rubitherm.

La lista de sustancias PCM consideradas en este trabajo, ya caracterizadas, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Caracterización de los PCM.

PCM	Pureza	Calor latente (kJ/kg)	Rango de Temperatura de Cambio de Fase (°C)
Aceite de coco	Industrial	105,0	15 - 22.5
RT 25 HC	Analítica	230,0	25 - 26
RT 28 HC	Analítica	250,0	28 - 29
Grasa Vacuna	Industrial	100,0	28 - 37.5
Cera de soja	Industrial	175,1	45 - 57
Estearina	Industrial	198,8	52 - 58.5
Parafina	Industrial	123,5	52 - 60

La tabla 2 muestra las propiedades termo-físicas encontradas en la bibliografía y en las hojas técnicas:

Tabla 2: Propiedades termo-físicas de los PCM considerados.

PCM	Punto de fusión (°C)	Punto de solid. (°C)	Costo (ARS / kg)	Calor latente (kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m °C)	Calor específico (kJ/kg °C)
Aceite de coco	22,5	15,0	10000,0	105,0	920,0	0,3	2,8
RT 25 HC	26,0	25,0	24844,2	230,0	825,0	0,2	2,0
RT 28 HC	29,0	28,0	22286,5	250,0	825,0	0,2	2,0
Grasa Vacuna	37,5	28,0	1260,4	100,0	914,2	0,7	3,5
Cera de soja	48,0	33,0	2400,0	175,1	900,0	0,3	1,9
Estearina	58,5	51,0	6000,0	198,8	940,0	0,3	2,6
Parafina	59,0	37,0	2900,0	123,5	825,0	0,2	3,5

RESULTADOS

Pre-selección de los materiales

Después de filtrar la lista inicial con los requisitos presentados en la sección de Metodología, se seleccionaron los PCM que cumplen con estos requisitos. El aceite de coco fue descartado, si bien su temperatura de fusión de 24 °C cumple con los requisitos establecidos, su temperatura de solidificación reportada de 15 °C se encuentra por debajo del rango objetivo de 20 a 32 °C. Por lo tanto, no fue incluido en el análisis posterior mediante AHP y TOPSIS para la selección final de los PCM más adecuados. Resulta importante tener en cuenta la temperatura de solidificación de los PCM debido a que en este trabajo se buscan materiales PCM destinados al calefaccionado de viviendas.

La Tabla 3 muestra los PCM preseleccionados, junto con las cuatro propiedades más relevantes para el problema planteado.

Tabla 3: Pre-selección de los PCM.

PCM	Costo (ARS / kg)	Calor latente (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/m °C)	Calor específico (kJ/kg °C)
RT 25 HC	24844,2	230,0	0,2	2,0
RT 28 HC	22286,5	250,0	0,2	2,0
Grasa Vacuna	1260,4	100,0	0,7	3,5
Cera de soja	2400,0	175,1	0,3	1,9
Estearina	6000,0	198,8	0,3	2,6
Parafina	2900,0	123,5	0,2	3,5

Ponderación de los criterios mediante el método AHP

A continuación, se establece el orden de importancia de los criterios de entrada del método AHP y TOPSIS. El costo fue considerado el criterio de mayor importancia, seguido por el calor latente, la conductividad térmica y, en último lugar, el calor específico del material. La valoración inicial de estos criterios se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4: Entrada del método AHP.

Prioridades AHP		Comparaciones por pares	
		¿Cuánto más?	
Costo (ARS / kg)	vs.	Calor latente (kJ / kg)	2
Costo (ARS / kg)	vs.	Conductividad térmica (W / m °C)	4
Costo (ARS / kg)	vs.	Calor específico (kJ / kg °C)	6
Calor latente (kJ / kg)	vs.	Conductividad térmica (W / m °C)	3
Calor latente (kJ / kg)	vs.	Calor específico (kJ / kg °C)	5
Conductividad térmica (W / m °C)	vs.	Calor específico (kJ / kg °C)	5

Estos valores se utilizan como entrada para el método AHP a fin de determinar la relación de importancia de cada propiedad. Los resultados obtenidos del AHP se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados del método AHP.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	49,0%	1
Calor latente (kJ / kg)	30,8%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	14,9%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	5,3%	4
CR	0,07	

Los resultados del método AHP muestran que el costo tiene una prioridad del 49,0% y que es la propiedad más importante; el calor latente tiene el segundo lugar con una prioridad del 30,8%; la conductividad térmica tiene una prioridad del 14,9%, y el calor específico tiene una prioridad del 5,3%.

El valor de CR de 0,07 indica que la consistencia de las comparaciones realizadas en el proceso de AHP es aceptable y confiable.

Resultados del método TOPSIS

Se aplica el método TOPSIS para evaluar la idoneidad de los PCM para su aplicación en acumulación de calor para colectores solares calentadores de aire. La Tabla 6 muestra la matriz final obtenida.

Tabla 6: Matriz final para el método TOPSIS.

PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,387	0,087	0,184	6
RT 28 HC	0,384	0,101	0,207	5
Grasa Vacuna	0,101	0,387	0,794	1
Cera de soja	0,205	0,196	0,489	2
Estearina	0,323	0,093	0,224	4
Parafina	0,254	0,154	0,378	3

Según estos resultados, se determinó que la grasa vacuna obtuvo la mejor puntuación, seguida de la cera de soja, la parafina, la estearina, el RT 28 HC y el RT 25 HC.

Resultados del análisis de sensibilidad

Se realiza el análisis de sensibilidad considerando variaciones en la importancia relativa de cada propiedad evaluada. En la Tabla 7 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad considerando el costo, mientras que en la Tabla 8 se muestran los resultados considerando el calor latente.

Tabla 7: Resultados del análisis de sensibilidad considerando el costo.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	66,6%	1
Calor latente (kJ / kg)	19,0%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	10,5%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	3,9%	4
CR	0,13	

PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,517	0,054	0,094	6
RT 28 HC	0,514	0,062	0,108	5
Grasa Vacuna	0,062	0,517	0,893	1
Cera de soja	0,262	0,259	0,497	2
Estearina	0,430	0,096	0,182	4
Parafina	0,316	0,208	0,397	3

Tabla 8: Resultados del análisis de sensibilidad considerando el calor latente.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	48,2%	1
Calor latente (kJ / kg)	30,3%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	17,0%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	4,5%	4
CR	0,16	

PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,384	0,086	0,183	6
RT 28 HC	0,381	0,099	0,206	5
Grasa Vacuna	0,099	0,383	0,795	1
Cera de soja	0,205	0,194	0,486	2
Estearina	0,320	0,092	0,223	4
Parafina	0,254	0,151	0,373	3

En ambos casos, se observa que la clasificación de los PCM se mantiene consistente y confiable.

Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad considerando la conductividad térmica, cuyos resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados del análisis de sensibilidad considerando la conductividad térmica.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	44,2%	1
Calor latente (kJ / kg)	41,1%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	10,6%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	4,1%	4
CR	0,17	

PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,346	0,116	0,252	6
RT 28 HC	0,344	0,134	0,281	5
Grasa Vacuna	0,134	0,346	0,720	1
Cera de soja	0,189	0,184	0,494	2
Estearina	0,291	0,106	0,267	4
Parafina	0,240	0,140	0,369	3

Una vez más, se encontró que la clasificación de los PCM es consistente y confiable.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Se emplearon las técnicas TOPSIS y AHP para seleccionar los materiales de cambio de fase más adecuados en sistemas de calentamiento solar de aire con fines de calefacción de viviendas.

En la aplicación del método AHP no se consideró el criterio de la temperatura de cambio de fase, ya que este fue utilizado previamente como restricción para la pre-selección de los PCM candidatos. Por lo tanto, las temperaturas de fusión y de solidificación no se incluyeron en la matriz de comparaciones del AHP, quedando solo los criterios de costo, calor latente, conductividad térmica y calor específico.

Los resultados del AHP mostraron la siguiente importancia relativa de los criterios evaluados: costo (0,490), calor latente (0,308), conductividad térmica (0,149) y calor específico (0,053). Estos pesos se utilizaron posteriormente en el análisis TOPSIS para clasificar los PCM en función de sus puntajes de desempeño.

De acuerdo al análisis TOPSIS, la grasa vacuna obtuvo la mejor puntuación (0,794), seguida por la cera de soja (0,489), la parafina (0,378), estearina (0,224), RT28HC (0,207) y RT25HC (0,184).

Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados de la selección. Para ello, se variaron los pesos de los criterios y se observó que la clasificación final no se alteró frente a los cambios en la entrada introducidos. Esto demuestra la consistencia y confiabilidad del proceso de selección.

Los valores de CR obtenidos en el análisis de sensibilidad resultaron levemente superiores al valor recomendado de 0,1, siendo de 0,13, 0,16 y 0,17 para las variaciones en el costo, el calor latente y la conductividad térmica, respectivamente. Si bien estos valores indican una inconsistencia en las comparaciones realizadas, los mismos se consideran aceptables ya que no invalidan las conclusiones obtenidas ni la clasificación resultante de los PCM mediante el método TOPSIS. En todo caso, debido a que el análisis de sensibilidad arrojó un resultado del TOPSIS robusto y confiable, el hecho de tener un valor de CR superior a 0,1 implica que el análisis se hizo incluso seteando valores de los pesos de las comparaciones de a pares más allá de lo que el análisis de sensibilidad recomienda.

En cuanto a los materiales evaluados, se encontró que los dos PCM de la compañía Rubitherm cumplían con los requisitos de temperatura establecidos. Estos materiales mostraron resultados competitivos en la clasificación final del TOPSIS. Sin embargo, la grasa vacuna, a pesar de no ser un material de pureza analítica, exhibe la mejor puntuación.

CONCLUSIÓN

En este estudio, se evaluó la idoneidad de materiales disponibles localmente en la provincia de Salta y dos materiales ofrecidos por la empresa Rubitherm. Los siguientes PCM fueron seleccionados como

candidatos para la acumulación de calor en sistemas de calentamiento solar de aire: grasa vacuna, cera de soja, estearina, parafina, RT 28 HC y RT 25 HC.

Utilizando la combinación de los métodos TOPSIS y AHP se estableció los pesos relativos de los criterios de selección. Los resultados del análisis TOPSIS indicaron que la grasa vacuna es el material más adecuado, seguida de la cera de soja, la parafina, la estearina, RT 28 HC y RT 25 HC. La grasa vacuna resultó ser el PCM más adecuado debido principalmente a su bajo costo y alta conductividad térmica. Si bien los productos Rubitherm mostraron buen desempeño, su alto costo los posicionó en los últimos lugares.

Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados, y se determinó que la clasificación final no se vio afectada significativamente por la variación en los pesos asignados a los criterios. Esto valida la consistencia y confiabilidad del proceso de selección realizado.

En conclusión, este estudio demuestra que la combinación de los métodos TOPSIS y AHP es una metodología efectiva para la selección de PCM en aplicaciones solares térmicas. Los hallazgos brindan información valiosa para que investigadores e ingenieros elijan los materiales PCM más apropiados en función de los requisitos de aplicación. Los resultados también proporcionan una guía confiable para la elección de estos materiales, considerando múltiples criterios relevantes al problema.

REFERENCIAS

- Aftab, W., Usman, A., Shi, J., Yuan, K., Qin, M., y Zou, R. (2021). Phase change material-integrated latent heat storage systems for sustainable energy solutions. *Energy & Environmental Science*, 14(8), 4268-4291.
- Arroyo-Cañada, F. J., y Gil-Lafuente, J. (2019). A fuzzy asymmetric TOPSIS model for optimizing investment in online advertising campaigns. *Operational Research*, 19(3), 701-716.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mastellone, M., y Vanoli, G. P. (2019). Phase change materials for reducing cooling energy demand and improving indoor comfort: A step-by-step retrofit of a Mediterranean educational building. *Energies*, 12(19), 3661.
- Ehid, R., y Fleischer, A. S. (2012). Development and characterization of paraffin-based shape stabilized energy storage materials. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 84-91.
- Jurinak, J., y K. Abdel. (1978). Sizing of phase change energy units for air based solar heating systems. *Solar Energy* 22:355-9.
- Karami, A. (2011). Utilization and comparison of multi attribute decision making techniques to rank bayesian network options (Tesis de Maestría). Recuperado de <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:his:diva-5276>.
- Karim, R., y Karmaker, C. L. (2016). Machine selection by AHP and TOPSIS methods. *American Journal of Industrial Engineering*, 4(1), 7-13.
- Saaty, T. L., (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Shukla, A., Agarwal, P., Rana, R. S., & Purohit, R. (2017). Applications of TOPSIS algorithm on various manufacturing processes: a review. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5320-5329.
- Tyagi, V. V., Pandey, A. K., Kaushik, S. C., y Tyagi, S. K. (2012). Thermal performance evaluation of a solar air heater with and without thermal energy storage: an experimental study. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 107(3), 1345-1352.
- Waqas, A., y S. Kumar. (2011). Utilization of latent heat storage unit for comfort ventilation of buildings in hot and dry climates. *International Journal Green Energy* 8(1):1-24.
- Xu, H., Sze, J. Y., Romagnoli, A., y Py, X. (2017). Selection of phase change material for thermal energy storage in solar air conditioning systems. *Energy Procedia*, 105, 4281-4288.
- Yadav, S. K., Joseph, D., & Jigeesh, N. (2018). A review on industrial applications of TOPSIS approach. *International Journal of Services and Operations Management*, 30(1), 23-28.
- Yinping, Z., G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, y H. Di. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment* 42(6):2197-209.
- Yoon, K., y Hwang, C. L. (1985). Manufacturing plant location analysis by multiple attribute decision making: Part II. Multi-plant strategy and plant relocation. *International Journal of Production Research*, 23(2), 361-370.

Zhou, G., Y. Zhang, Q. Zhang, K. Lin, y H. Di. (2007). Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates. *Applied Energy* 84:1068–77.

ASSESSMENT OF THE MOST SUITABLE PHASE CHANGE MATERIALS FOR HEAT STORAGE IN A SOLAR AIR HEATER

ABSTRACT In this work a methodology to evaluate the most suitable PCM for solar air heaters using multi-criteria decision-making methods (MCDM) is presented. Specifically, a combination of the TOPSIS and AHP methods is used to rank materials based on cost, latent heat, thermal conductivity, and specific heat capacity. PCM available locally and commercialized with melting points in the range of 20-70°C were evaluated. The AHP method determined weights for each criterion, which are used in the TOPSIS analysis. Results showed that beef tallow achieved the highest score, followed by soy wax, paraffin, stearin, and finally two paraffins marketed by Rubitherm. A sensitivity analysis verified the robustness of the ranking. The study demonstrates an effective methodology for selecting optimal PCM for solar thermal applications using multiple relevant criteria.

Keywords: Phase change materials, Solar air heater, Thermal efficiency, TOPSIS and AHP analysis.