

INDICE AVERMA 2018

1. ARQUITECTURA Y HÁBITAT CONSTRUIDO

- CAMBIANDO LOS PARADIGMAS: REVISIÓN DEL CONCEPTO DE CONFORT HIGROTÉRMICO DESDE LOS 60' HASTA LA ACTUALIDAD. 01.01
G. Arrieta, A. Maristany
- EVALUACIÓN TÉRMICA DE VIVIENDA RURAL BIOCLIMÁTICA EN TIERRA CRUDA CON DINÁMICA DE FLUIDOS 01.13
M. Cúnsulo, C. Martínez
- MODELO ANALÍTICO PARA ESTIMAR EL CONSUMO ENERGÉTICO PARA CLIMATIZACIÓN DE VIVIENDAS EN RÉGIMEN DINÁMICO. PARTE 2: REQUERIMIENTO DE ENERGÍA PARA CALEFACCIÓN DE UNA VIVIENDA PARA UN MES ESPECÍFICO 01.25
R. Stagnitta; A. Gastón, R. Abalone
- IMPACTO DE SISTEMAS DE ENVERDECIMIENTO VERTICAL EN EL COMPORTAMIENTO TERMO-ENERGÉTICO DE ESPACIOS URBANO EDIFICIOS. ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE 01.37
P. Suárez, M. A. Cantón, É. N. Correa
- CALIDAD AMBIENTAL DE LAS AULAS DE COLEGIOS EN EL TRÓPICO: EVALUACIÓN SUBJETIVA Y OBJETIVA DEL CONFORT TÉRMICO, VISUAL Y SONORO 01.49
Montoya O., San Juan G.
- ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO HIGROTÉRMICO DE UN PROTOTIPO CON TEJAS DE MATERIAL COMPUESTO 01.61
H. Sulaiman, M. P. Sánchez Amono, R. Gaggino, C. Filippin, M. J. Positieri
- ENSAYO DE DOSIFICACIONES PARA BLOQUES, LADRILLOS Y CONTRAPISOS DE HORMIGÓN CON DESECHOS PLÁSTICOS Y FINOS DE PERLITAS 01.71
A. E. Díaz, A. L. Hernández
- RECICLADO EDIFICIO DE UNA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL EN BERISSO, BUENOS AIRES, ARGENTINA 01.83
Viegas, G.; Chévez, P.; Garganta, M. L.; Jodra, J.I.; Díscoli, C.

2. ENERGÍA SOLAR: APLICACIONES TÉRMICAS, AGRÍCOLAS, QUÍMICAS E INDUSTRIALES

- SECADO DE MANZANA EN SECADERO TUNEL DE LABORATORIO Y EN SECADERO SOLAR EN CONVECCIÓN NATURAL. MODELIZACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO 02.01
A. Iriarte y S. Bistoni

CIRCUITO TÉRMICO PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL UTILIZANDO UN CONCENTRADOR CILINDRICO PARABÓLICO. DISEÑO, DESARROLLO Y EVALUACIÓN TÉRMICA. J. Garnica, J. Daghero, D. Longoni, M. Ortiz	02.13
ESTUDIO GEOMETRICO DE UN HORNO SOLAR PARA PROCESAMIENTO DE MINERALES A ALTAS TEMPERATURAS C. Placco, M. Gea, M. Bonini, E. Gutiérrez, C. Fernández, H. Suligoy	02.25
NUEVO CALENTADOR SOLAR DE AIRE CON MATRIZ POROSA SELECTIVA. DESARROLLO TECNOLÓGICO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL F. López, A. Hernández	02.37
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INDIRECTO DE CALEFACCIÓN SOLAR TÉRMICA DE AIRE, APLICADO AL SECADO DE HIERBAS J. M. Morsetto, A. I. Lema, M. I. Pontin y J. M. Lucchini	02.49
SIMULACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA SOLAR COLECTADA POR CUERPOS GEOMÉTRICOS ASOCIADOS A FORMAS DE COPA DE ÁRBOL PARA DÍA DE CIELO CLARO USANDO EL MODELO DE BIRD G. Salazar, D. Salve, P. Gerbi	02.61
SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SECADERO SOLAR DIRECTO PASIVO MEDIANTE SIMUSOL A. Salvo, P. Dellicompagni, N. Sarmiento, J. Franco, R. Echazú	02.73
MODELIZACIÓN NO UNIFORME DE LA DISTRIBUCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN UN ABSORBEDOR LINEAL TIPO FRESNEL M. Hongn, S. Flores Larsen, P. Dellicompagni, D. Chocobar	02.85
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS SOLARES PARA CALENTAR AGUA USANDO UN PROGRAMA DINÁMICO E. D. Albizzati	02.99
ARQUITECTURA SUSTENTABLE. AJUSTE DEL PROGRAMA DE BALANCE TÉRMICO EN EL CÁLCULO DE ENERGÍA AUXILIAR DE CALEFACCIÓN Esteves A., Scalia A., Gelardi D.	02.107
SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA SOLAR TÉRMICA DE GRAN ESCALA SITUADA EN LA LOCALIDAD DE SAN CARLOS, SALTA M. Hongn, R. Lozano, G. Salazar	02.119
MODELADO DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN BIODIGESTOR, CALEFACCIONADO CON ENERGÍA SOLAR, MEDIANTE EL SOFTWARE SIMUSOL J.N. Martín, G. Barea, S. Manrique, A. Esteves	02.131

3. ENERGÍA SOLAR: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA

- ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA EM SÉRIE E EM PARALELO COM A TEMPERATURA 03.01
F. D. Kipper, F. P. Gasparin, C. S. Ruschel, A. Krenzinger
- AValiação EconôMica e Energética de Unidades Prossumidoras Residenciais com Sistemas Fotovoltaicos em Operação no Sul do Brasil 03.15
L.T. Scarabelot, G. A. Rampinelli, C. R. Rambo
- PREDICCIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA CON TÉCNICAS DE APRENDIZAJE SUPERVISADO 03.25
W. Herrera Martinez, A. Moreno, A. C. Reybet, S. Saint-André
- POSIBLE APORTE DE LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA AL PROBLEMA ENERGÉTICO EN COMUNIDADES AISADAS DE LA PATAGONIA CASO DE ESTUDIO: COMUNA DE TELSEN - CHUBUT 03.35
A. Kräutner, E. M. Godfrin, J.C. Durán
- MONITOREO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN 03.45
Mariela. E. Videla, Ismael H. EyraS, Julio C. Durán
- ANÁLISE DO PERFIL DE BORO PARA PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BASE P COM REDUÇÃO DE ETAPAS TÉRMICAS 03.57
T. Crestani, I. Zanesco, A. Moehlecke, M. Ly.

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

- VALORACIÓN ACTUALIZADA DEL POTENCIAL EÓLICO DE NEUQUÉN 04.01
S. Troncoso, C. Palese
- SORGO FIBROSO COMO ALTERNATIVA PARA LA INTERZAFRA AZUCARERA EN TUCUMÁN. 04.13
M. C. Cruz, G. De Boeck, D. Paz
- ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOÉSSICOS: CÁLCULO y DISEÑO PARA CASO DE ESTUDIO. 04.23
M. E. Carro Pérez, A. Peiretti, F. M. Francisca
- SECUESTRO DE METANO (CH₄) BAJO COBERTURA DE BOSQUE NATIVO 04.35
S. Ontiveros, S. Manrique, J. Franco, D. Camacho
- SIMULACIÓN MEDIANTE MODELOS ANALÍTICOS DE ESTELA EN PARQUES EÓLICOS Y VALIDACIÓN CON MEDICIONES DEL PARQUE EÓLICO RAWSON 04.47
F. Lazzari, A. Otero

5. POLÍTICAS Y ECONOMÍA EN EL USO EFICIENTE Y RACIONAL DE LA ENERGÍA

- COGENERACIÓN EN CHILE: CAPACIDADES, DESARROLLO Y PERSPECTIVAS 05.01
A. Poque Gonzalez, Y. Masip Macía, J. Valdes, L. Ramírez Camargo
- AHORRO ENERGETICO EN ESTUFAS DE CURADO DE TABACO DEL TIPO BULK-CURING MEJORADAS 05.11
M. Condori, F. Albesa, C. Martínez
- PANORAMA ATUAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL E O PAPEL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO SETOR 05.21
F. Perin Gasparin, A. J. Bühler
- LA PLANIFICACIÓN ENERGETICA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES: UN ESTUDIO DE PERCEPCION SOCIAL Y VALIDACION SOCIAL DEL MODELO DE PLANIFICACION ENERGÉTICA DE CINCO DIMENSIONES 05.33
Cruz I., Saud J., M. Condorí

6. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

- DESARROLLO DE SISTEMA PARA INTEROPERABILIDAD DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN PROYECTO DE RED INTELIGENTE CON APORTE DE FUENTES RENOVABLES. PRIER - ARMSTRONG (SANTA FE, ARGENTINA) 06.01
M. Politi, A. Cruz, C. Acosta, J. L. González, H. Laiz
- SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA PANELES FOTOVOLTAICOS 06.13
R. A. Echenique, E. J. Perino, L. A. Odicino, D. A. Perelló, R. M. Murdocca
- SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES PARA HELIÓSTATO 06.25
R. Casimiro, M. Gea, D. Hoyos y C. Placco
- GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA ASOCIADA A VEHÍCULOS ELÉCTRICOS 06.37
Pierantonelli M., Medina J. C., Quintilla T.
- DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFAZ PARA SISTEMA DE MONITOREO Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE RADIACIÓN Y TEMPERATURA EN UN PARQUE FOTOVOLTAICO EN SALTA 06.49
M. Villena, V. Serrano, C. Sarabia, C. Caniza, V. Javi y F. Zutara

7. RADIACIÓN SOLAR Y CLIMA

- CARACTERIZACIÓN ANGULAR AUTOMATIZADA DE SENSORES SOLARES FOTOVOLTAICOS 07.01
M. Díaz Salazar, N. Kondratiuk, A. Moreno, M. Martínez Bogado, M. Tamasi, J. Di Santo

NUEVO ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA: RESULTADOS PRELIMINARES R. Aristegui, R. Righini, V. Stern, J. Lell, S. Bazán	07.11
SOBRE LA COMPLETITUD DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS DE IRRADIACIÓN SOLAR EN LUJÁN, PROVINCIA DE Bs. As. S. Luza Regueiro, R. Righini, S. Bazán, A. J. Roldán	07.21
ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES MODELOS PARAMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA DIRETA NA INCIDÊNCIA NORMAL (DNI) EM BOTUCATU/SP/BRASIL. C. M. Santos, J. F. Escobedo, C. O. Carvalho, M. B. P. Silva, J. M. S. Ferrari	07.27
DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO INDOOR DE CÉLULAS DE REFERÊNCIA PARA MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR A. P. Rosso, G. A. Rampinelli	07.39
ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA TASA DE CAMBIO A CORTO PLAZO DE LA IRRADIANCIA SOLAR CON APLICACIONES EN ENERGÍA FOTOVOLTAICA E. Wolfram, F. Orte, J. Pallotta, R. D'Elía, C. Libertellil, F. Carmona, E. Luccini, N. Porello, J. Ubogui	07.49
RADIACIÓN UV ERITÉMICA EN LA PUNA: ESTUDIO ESTADÍSTICO DIARIO Y HORARIO PARA UN AÑO TÍPICO H. Suárez, D. Acosta, C. Cadena, G. Suárez	07.57
 8. HÁBITAT, ENERGÍA	
NUEVAS CARRERAS EN ENERGÍAS RENOVABLES EN URUGUAY: INGENIERÍA Y TECNÓLOGO J.F. Mathisson Malvasio, M. Coletto, M.P. Calcagno, G. Suárez, J.M. Aguiar	08.01
APLICACIÓN DE LOS INDICADORES DE REFERENCIA “WASTE AWARE” PARA EL DIAGNÓSTICO DEL RENDIMIENTO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL CONSORCIO CACHI- PAYOGASTA (SALTA). Villafañe, F.A., Manrique, S.M.	08.13
HACIA UNA GESTIÓN PLANIFICADA EN EL DEPARTAMENTO DE CACHI (SALTA): CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Villafañe, F.A., y Manrique, S.M.	08.25
LA CENTRALITA FVCEL COMO RECURSO PARA LA DIFUSIÓN DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA CIUDAD DE ORÁN D. Mendoza, P. A. Mendoza, V. M. Javi, C. I. Castro, J. M. Mendoza	08.37
EJERCICIOS EDUCATIVOS ALREDEDOR DEL CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES V. M. Javi, R. Rodríguez Soler, I. J. Arroyo, G. A. Pastrana	08.49

SISTEMA DE INFORMACIÓN SOLAR (SISol). APORTES A LA IMPLEMENTACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE ENERGÍAS RENOVABLES EN SALTA Sarmiento N.M., Franco A.J., Belmonte S. Gisela Gallucci	08.61
PROPUESTA Y ANÁLISIS DE TARIFAS PARA USUARIOS RESIDENCIALES DEL MERCADO DISPERSO DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA C. Ramos Caro, A. Iriarte, C. Cadena	08.73
ACONDICIONAMIENTO BIOCLIMÁTICO Y LUMINICO DE UN CENTRO DE PROPAGACIÓN AGÁMICA DE PLANTAS EN INTA - CATAMARCA V. García, A. Iriarte, S. Flores Larsen	08.85
RE-EVALUACION DE UN PLAN DE SEGURIDAD DEL AGUA (PSA): MEDIDAS DE CONTROL Y CONCEPTO DE RIESGO VIRTUAL Y REAL M. A. Gutiérrez López, M. S. Rodríguez Alvarez, M. A. Iribarnegaray, A. M. Clavijo Lara, L. Seghezzo	08.97
BOSQUES POLÍTICOS: UN ESTUDIO DE LA HISTORIA AMBIENTAL DE SALTA FORESTAL S.A. EN EL PERIODO 1974-2017 DESDE EL ENFOQUE DE LA ECOLOGÍA POLÍTICA C. Ortega Insaurralde, L.L. Huaranca, M.R. Montenegro, L. Seghezzo	08.105
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL OCEANO EN EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LOS EDIFICIOS: ANÁLISIS RETROSPECTIVO, PRESENTE Y PROSPECTIVO D. Morillón, R. Silva, R. Lopez, J. A. E. Santos	08.117

CAMBIANDO LOS PARADIGMAS: REVISIÓN DEL CONCEPTO DE CONFORT HIGROTÉRMICO DESDE LOS 60' HASTA LA ACTUALIDAD.

G. Arrieta ¹, A. Maristany ².

Centro de investigaciones Acústicas y luminotécnicas (CIAL) – Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño (FAUD) Universidad Nacional de Córdoba (UNC) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – El Cordobazo s/n – Ciudad Universitaria – Córdoba Capital -
C.P:5000 - <http://cial.faudi.unc.edu.ar/>
– Tel: 0351 433-3037 e-mail: cial@cial.unc.edu.ar

Recibido 10/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: Muchos son los autores que se refirieron al confort higrotérmico en sus investigaciones a lo largo de la historia, y variadas las definiciones de este concepto. En general, todas ellas se refieren a ausencia de malestar térmico o sensación de bienestar térmico, poniendo especial énfasis en la percepción de las personas. En la actualidad coexisten dos modelos que predicen su cuantificación. El modelo de balance térmico (basado en estudios de laboratorio) y el modelo adaptativo (basado en estudios de campo). Habiendo cambiado las pretensiones de confort de las personas mientras que los criterios constructivos de la arquitectura residencial se mantienen constantes, aumentando significativamente el consumo energético de las ciudades. En este trabajo, se realiza una revisión de la evolución del paradigma de confort desde los años 60' hasta la actualidad y se analiza su impacto en la arquitectura y el consumo energético residencial de acuerdo al modelo de confort adoptado.

Palabras claves: Paradigma de confort, Arquitectura adaptada al clima, Eficiencia energética.

INTRODUCCIÓN

El hombre, como los demás seres vivos ha de adaptarse a los límites impuestos por las condiciones climáticas de la naturaleza, desarrollando a lo largo de su evolución habilidades y capacidades para soportarlas. A diferencia de las demás especies, tiene la capacidad agregada de adaptarse al medio modificando voluntaria o involuntariamente las condiciones de la vestimenta o la vivienda. Actualmente hay una tendencia a exigirle demasiado a los mecanismos artificiales de regulación climática, excediendo los niveles de confort suficientes para tener inactivos los mecanismos de termorregulación natural, que indicarían una sensación de confort a nivel biológico. Son muchos los autores que se interesaron por definir el confort higrotérmico y especificar los parámetros que en el intervienen. Ejemplo de éstos son:

- “La ausencia de irritación o malestar térmico”. (Givoni, 1998); citado por Gómez-Azpeitia et al, (2007, p.50).
- “Aquella condición de la mente que se expresa satisfacción con el ambiente térmico” ISO 7730:2005 ; ASHRAE (2001); Citado por (Gómez-Azpeitia et al., 2007, p.50).

¹Becaria interna doctoral CONICET

² Titular de Catedra e Investigador Categoría 1 – Director CIAL - FAUD - UNC.

- “Cuando el balance térmico arroja un valor cero, es decir cuando el cuerpo humano no gana ni cede calor, significa, según este enfoque, (Cuantitativo) que las personas experimentan objetivamente una sensación térmica de confort.” (Gómez-Azpeitia et al., 2007, p.46)
- (Jara, 2015) Describe que el concepto de confort térmico fue abordado por tres líneas. La línea racional que lo describe como equilibrio térmico del cuerpo. La línea fisiológica que establece que la percepción térmica de un individuo es debido a los impulsos nerviosos. Y la línea psicológica que lo define como aquella condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico (considerado en los estándares internacionales como ISO 7730 y ASHRAE 55).(UNE-EN ISO 7730, 2006)

Lo cierto es que “Si los rangos de confort térmico fuesen universales o iguales para todo tipo de edificios, personas y climas; entonces este perdería trascendencia en la respuesta que el diseño arquitectónico podría dar a este factor ambiental.” (Jara, 2015).

Además, se debe considerar el aumento del consumo energético de las ciudades, cada vez más densamente pobladas. Donde “Los espacios construidos cuentan con cerca del 40% de la energía global consumida y contribuye con más del 30% de las emisiones totales de CO₂. En gran proporción, esa energía es usada para el confort térmico de esas construcciones”. (Yang et al, 2014, p.164). Sumado a un aumento global, gradual y constante de la temperatura terrestre.

“La sociedad actual exige lugares seguros, limpios y bien climatizados, para lo que es necesario integrar percepciones y exigencias de los habitantes y alcanzar un óptimo equilibrio entre estándares sociales, uso de la energía y desarrollo sostenible.”(Vargas y Pulgarín Gallego, 2005, p.1). En este marco se lleva a cabo esta investigación, detectando los cambios en el paradigma de confort que la sociedad viene experimentando en el tiempo, intentando alcanzar otros estándares en la actualidad. ¿Por qué bajo las mismas condiciones climáticas interiores, hace algunos años, el común de las personas se sentía confortable y ahora no? ¿Cómo y por qué cambiaron estos paradigmas? ¿Cuál es el impacto de estos nuevos paradigmas de confort en la adaptación energética de los edificios naturalmente acondicionados al medio? ¿Cuál es la problemática del confort actual y como es su relación con los edificios naturalmente acondicionados?

CAMBIOS EN LOS PARADIGMAS DE CONFORT

El confort en los años 60's:

La década del 60' fue caracterizada mundialmente por el crecimiento económico y los avances científico-tecnológicos. Se había comenzado a utilizar la computadora para fines civiles, el televisor y el extraordinario desarrollo de los medios de comunicación permitió difundir a nivel mundial los acontecimientos aislados como la llegada del hombre a la luna. A su vez, comenzaron a mejorar las condiciones de vida de la población mundial y sobre todo de la clase media. Se amplió la educación secundaria y universitaria a nuevos sectores y las mujeres se introdujeron en el mundo del trabajo. Los años 60' fueron tiempos de soñar, Los movimientos estudiantiles, la lucha por los derechos de Martin Luther King, todo se podía cuestionar. Argentina está convulsionada por las políticas militares, El Cordobazo en 1969 y los movimientos estudiantiles (Figura 1). La carrera espacial, que deriva en el futurismo, inspirado en la factibilidad de vivir en el espacio como algo absolutamente posible. Y por otro lado y totalmente opuesto, el movimiento hippie, de los jóvenes dando la espalda a la modernidad y la explosión del color y la psicodelia. La aparición de nuevos materiales, como el acrílico y los materiales sintéticos.

En este contexto, Banham propone en su texto “A Home is not a House” (Banham Reyner, 2012) una burbuja atemperada, que puede “inflarse y desinflarse” en un lugar y otro según se desee. Una burbuja que sea abastecida por una gran cantidad de energía para poner en funcionamiento los electrodomésticos en su interior que satisfacen las necesidades de la vida cotidiana. Se implantaba la idea de que la energía y la tecnología podían resolver de forma absoluta la vida de las personas, como el nuevo horizonte a seguir.

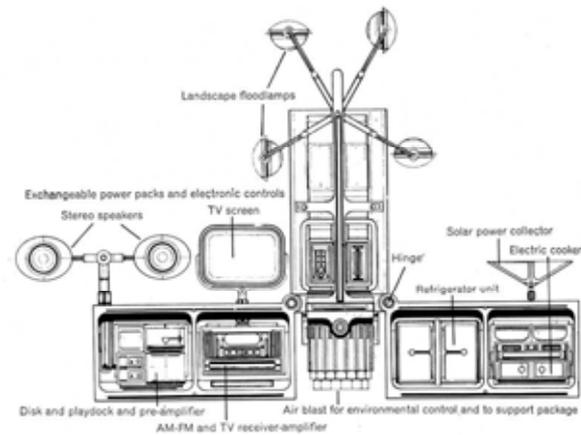
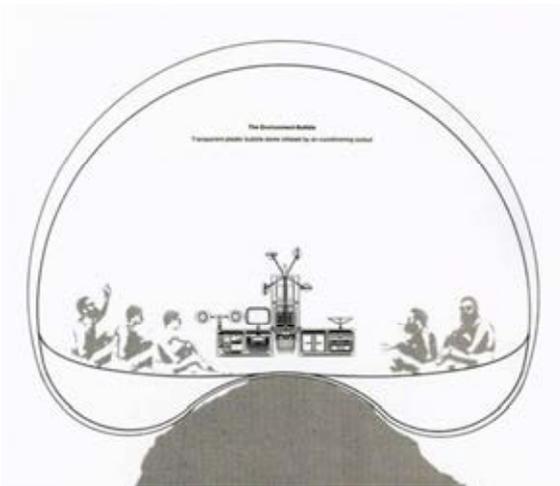


Figura 1: Burbuja de Banham "A Home is not a House". Fuente:(Banham Reyner, 2012)

El cambio de paradigma en los 73's con la crisis del petróleo:

La crisis del petróleo demostró en el mundo entero no sólo la importancia de este recurso natural, sino también la posibilidad de utilizarlo, al igual que otros recursos, como armas económicas o como instrumentos de presión internacional, o sea, otra herramienta más para aumentar el margen de maniobra de un país.

Para principios de los '80 casi todos los países latinoamericanos habían sido afectados por una profunda y prolongada recesión económica de los últimos años. Se vivió un descenso de los indicadores económicos y sociales, decaimiento significativo en producción y tasas de crecimiento. La crisis y los procesos de ajuste de los ochenta rompieron con el frágil balance que se tenía en el empleo, el cual había sido producto del crecimiento de las décadas anteriores. Para entonces, se evidenció que el petróleo era un recurso necesario para el funcionamiento de la mayoría de las cosas en la era de la tecnología y el desarrollo, y la no exportación de los países árabes al resto del mundo, obligaron a implementar políticas de ajuste que derribaron de inmediato el "sueño de la burbuja" y muchos otros pensamientos futuristas del momento. Se produjo una disminución en el consumo de energías y con ello un estancamiento del desarrollo tecnológico.

Se empieza a hablar de la conciencia sustentable. Años 90':

Durante este tiempo (movimiento moderno), el diseño arquitectónico tendió a desligarse de su contexto climático, centrándose en la creación de un clima interior regulado artificialmente para abordar las inclemencias climatológicas (Rodríguez, 2007). En este sentido, el modelo adaptativo, no hizo más que validar lo que la arquitectura vernácula o bioclimática viene planteando hace unos varios años atrás. Este modelo sugiere que los rangos de confort varían, y que uno de los principales factores que definen aquello; es el clima. En los años que le sucedieron, comenzó a abordarse el tema del desarrollo sostenible con especial interés. Se comenzó a definir el concepto de "sostenible", se abrió el debate sobre el efecto invernadero en el planeta y las consecuencias de no asumir la responsabilidad respecto del medio ambiente. Podemos enumerar los principales hechos en los siguientes:

- Informe Brutland (1987): Define por primera vez el desarrollo sostenible, como "aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones". En este informe se enfrenta y contrasta la postura del desarrollo económico actual junto con el de sustentabilidad ambiental. También se puso de manifiesto la necesidad de llevar a cabo una nueva conferencia a nivel mundial, dado que los objetivos propuestos en conferencias anteriores no estaban siendo cumplidos. Así, en 1992 se llevó a cabo la Conferencia Sobre Medio Ambiente y Desarrollo en Río de Janeiro.
- La Declaración de Río es la Conferencia de las Naciones Unidas (ONU) en 1992: Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible, que se celebró en Río de Janeiro (Brasil) y que se conoce como Segunda Cumbre de la Tierra. El Objetivo principal de la Declaración de Río es procurar alcanzar

acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses de todos, se proteja el medio ambiente y el desarrollo mundial. Se proclamaron 27 principios fundamentales que todos los países deberían cumplir, con el objetivo de establecer una alianza mundial nueva y equitativa.

- El programa 21 o llamado también agenda 21: se inició el 22 de diciembre de 1989 con la aprobación en la asamblea extraordinaria de las Naciones Unidas en Nueva York de una conferencia sobre el medio ambiente y el desarrollo, que luego de borradores del programa, culminó con la Conferencia de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas en Río de Janeiro 2012.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1994: Permite, entre otras cosas, reforzar la conciencia pública, a escala mundial, de los problemas relacionados con el cambio climático. En 1997, los gobiernos acordaron incorporar una adición al tratado, conocida con el nombre de Protocolo de Kioto (1997 / 2005), un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global.
- La Conferencia de desarrollo sostenible de Naciones Unidas: También conocida como Río 2012 o Río+20, se celebró coincidiendo con el 20º aniversario de la Cumbre de 1992. Los objetivos de la conferencia:
 1. Asegurar un renovado acuerdo político en desarrollo sostenible.
 2. Evaluar los progresos y brechas en la implementación de los acuerdos ya realizados.
 3. Abordar los retos nuevos y emergentes. Alcanzaron un acuerdo de mínimos sobre el borrador de conclusiones titulado "El futuro que queremos".
- La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático París (2015): Donde se consiguió alcanzar el llamado "acuerdo de París". Un pacto global, para reducir las emisiones como parte del método para la reducción de gases de efecto invernadero. En el documento, los miembros acordaron reducir sus emisiones de carbono "lo antes posible" y hacer todo lo posible para mantener el calentamiento global "muy por debajo de 2°C".

Con todos estos acontecimientos caracterizando los inicios de los años 90' se comienza a pensar en una arquitectura amigable con el clima y el entorno, se considera reducir las emisiones de gases causantes del efecto invernadero y con ello, el consumo de energía. Comienza a hablarse de la conciencia ambiental como una responsabilidad del hombre y de la "Arquitectura verde" como una tendencia.

En un momento de grandes avances tecnológicos para acceder a información climática de cada lugar, se considera a la tecnología como gran aliada, en una búsqueda individual intentando desarrollar la novedad conceptual de la misma. Búsqueda de la transparencia de las pieles en los edificios, y la puesta en relación de la arquitectura con los contextos.

La arquitectura adaptada al clima y el colapso del criterio tecnológico actual:

El objetivo del diseño con climatización pasiva es el alcance de mejor confort térmico; menor consumo de energía en calefacción y refrigeración; menor costo de energía y de mantenimiento y menor impacto ambiental. Como enfoque estratégico, climatización pasiva significa una forma de diseño de viviendas y otros espacios habitados que, para Müller (2002, p.1), ofrecen confort térmico con un consumo mínimo o cero de fuentes no renovables de energía, se adaptan a las condiciones climáticas locales y aprovechan el entorno para mejorar el confort térmico.

Se conocen los requisitos para que la arquitectura sea adaptada al clima, son claros los criterios y normas para lograr de forma pasiva el confort térmico de las personas en un ambiente determinado. Con múltiples referenciales, como en las IRAM, donde se especifica para cada zona bioambiental y sus características, el criterio constructivo a considerar para cada orientación. En el caso de que, siguiendo estos criterios normativos, igualmente no se alcance el estado de confort deseado, también se conocen las acciones internas o externas, voluntarias o involuntarias para acercar el ambiente térmico real al deseado. El problema radica en que actualmente prima una tendencia de exigir parámetros más extremos de los que se necesitan para estar biológicamente confortables. Hay una tendencia generalizada por regular los niveles de climatización mecánicos de los espacios interiores a

temperaturas muy frías en verano y muy calientes en invierno. Esto se hace imposible de sostener a través de los mecanismos pasivos de acondicionamiento conocidos, sin caer en un excesivo consumo energético. Reflejándose en el uso intensivo y cada vez mayor de sistemas de acondicionamiento artificiales. Esto deriva de forma inmediata en el consumo energético de las ciudades, a su vez, cada vez más densas, lo cual aumenta aún más el consumo. La crisis energética es una de las mayores preocupaciones actuales a nivel mundial, que compete cada vez a mayor cantidad de países, inclusive a los que se encuentran en vías de desarrollo.(Balter, Ganem, & Discoli, 2013).

Lo cierto es que, además, la arquitectura de los últimos años se ha vuelto absolutamente comercial, y primando en el diseño las necesidades de forma y estética, antes que las de confort. Están de moda las grandes fachadas vidriadas, el hormigón visto, superficies metálicas. Y en muchos casos, se calcula el acondicionamiento artificial como un ítem más del diseño interior. Esta situación, junto a la tendencia de crecimiento de construcción de viviendas residenciales, y de densidad en las ciudades, entre otros aspectos, motivó a distintos autores a evaluar edificios residenciales para analizar el comportamiento térmico- energético, las condiciones de confort y el comportamiento del usuario (Evans y De Schiller, 2001; Czajkowski et al., 2006; Alias, Jacobo, 2010; Filippín et al., 2010; Flores Larsen et al., 2010).(Balter et al., 2013). (Cruz González & Morales Bravo, 2009) en sus estudios realizados sobre las temperaturas neutrales o de confort, aseguran que “el análisis de correlación realizado entre la respuesta de sensaciones térmicas de los individuos encuestados (rsti) y la temperatura de globo medida, para cada estudio, permitió determinar las temperaturas neutrales o de confort para las personas en edificios con aire acondicionado ($T_n= 26.6^{\circ}\text{C}$) y en edificios naturalmente ventilados ($T_n= 28.6^{\circ}\text{C}$). En los edificios naturalmente ventilados, se acerca la sensación descrita por los individuos encuestados a la medida en el PMV (Voto Medio Previsto, índice establecido por Fanger, basado en una escala de siete niveles de sensación térmica, que predice el voto subjetivo de un grupo numeroso de personas respecto de su ambiente térmico).(Jara, 2015)

Es necesario reflexionar sobre el uso y abuso de los mecanismos de climatización artificial que estamos utilizando para lograr los estándares deseados y con ello el significativo incremento de la energía eléctrica consumida. La tecnología busca reducir el consumo de energía, pero las políticas de precios no colaboran para que los usuarios opten siempre por aquellos de menor consumo. Siendo significativamente más costosos, los artefactos de consumo A y B (Figura 2). No promocionando la utilización de energías alternativas como las solares a través de facilidades de acceso a las mismas.

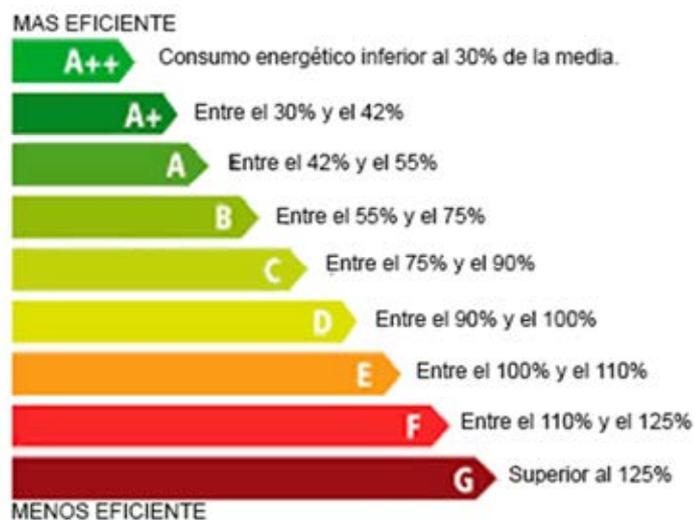


Figura 2: Etiqueta de eficiencia energética utilizada en artefactos eléctricos

CONCEPTO DE CONFORT HIGROTÉRMICO - DOS ENFOQUES

El confort térmico es un objetivo importante del entorno construido, ya que determina gran parte del grado de satisfacción de sus ocupantes, su salud y su productividad. (Kim, Schiavon, & Brager, 2018).

El confort térmico no sólo depende de factores ambientales; también de las condiciones físicas, fisiológicas y psicológicas del ser humano. Es por ello que su cuantificación resulta compleja, subjetiva y variable (Nematchoua et al, 2014). En la actualidad, dos son los conceptos planteados para la predicción de éste: Balance térmico y Adaptación (Jara, 2015).

Según aseguran (Gómez-Azpeitia et al., 2007), la determinación de una temperatura ideal de diseño resulta en todos los casos el eje fundamental en la toma de decisiones. ¿Cómo puede determinarse esa temperatura en que las personas se sientan en confort, a fin de diseñar, construir y operar los edificios de la manera más sustentable posible? la respuesta a esta pregunta, que podría parecer sencilla, confronta dos enfoques teóricos que responden a su vez a los paradigmas fundamentales del quehacer científico moderno: el cuantitativo y el cualitativo.

El enfoque cuantitativo y los modelos de predicción:

Este enfoque, también llamado de estado estacionario, considera desde el punto de vista biológico, físico y químico a todos los seres humanos iguales, equiparando las sensaciones de estos y sus indicadores, independientemente de las condiciones del ambiente térmico donde se encuentren. (Taleghani, Tenpierik, Kurvers, & Van Den Dobbelsteen, 2013) asegura que el cuerpo humano se esfuerza para lograr el equilibrio térmico.

El PMV, considera el confort como un fenómeno físico y fisiológico. Expresa la sensación térmica humana como una transferencia de calor entre el cuerpo humano y el medio circundante. Fanger en 1973 inicia los modelos que se han denominado de predicción, pues supuestamente son capaces de predecir lo que las personas sentirían ante tal o cual ambiente térmico. Es el modelo más ampliamente aceptado, desarrollado a través de amplias investigaciones en laboratorio por Fanger y se transformó en las bases para los estándares ISO 7730 (UNE-EN ISO 7730, 2006) y ASHRAE 55 (ASHRAE STANDARD 55, 2004). (Kim et al., 2018). Como expresan (Re, Filippin, & Blasco Lucas, 2017), en su estudio en edificios áulicos “se confirma la importancia de contar con datos locales para definir los rangos de confort según la zona bioambiental y la tipología edilicia, tomando a las normas extranjeras, elaboradas en consideración a otras costumbres y condiciones ambientales, como una referencia y no un condicionante”. Y es aquí donde entran en juego los modelos de adaptación. Sin embargo, al tratarse de un modelo estacionario, no tiene en cuenta las variaciones de temperatura a lo largo del día, es resultado de investigaciones en cámaras térmicas y solo es aplicable a humanos expuestos a un largo periodo en condiciones constantes y con una tasa metabólica constante (Fanger 1973; Muñoz Godoy, 2012).

El enfoque cualitativo y los modelos de adaptación:

Luego de haber sido implementado el modelo de Fanger, se le descubrieron algunas debilidades. Humphreys y Nicol evaluaron las teorías de confort basándose en estudios de campo (Taleghani et al., 2013) notando una diferencia entre éstos estudios de campo y las predicciones de confort basadas en el modelo de balance térmico, señalaron que el cálculo PMV difiere del voto promedio real y el PMV casi siempre subestima los votos medios reales.

Los modelos de balance térmico, también llamados como estáticos o constantes, fueron la base de los trabajos pioneros de Gagge y Fanger (Brager y Dear, 1998) y han sido la base adoptada en la mayoría de los estándares de confort térmico actuales (Muñoz Godoy, 2012). Los principios de este modelo, establecen que no puede considerarse solo el intercambio de calor entre el cuerpo y el entorno para entender el confort térmico. Sino que además, hay acciones voluntarias o involuntarias que el ser humano es capaz de realizar para alcanzarlo. Modificar la generación interna de calor, modificar la tasa de pérdida de calor del cuerpo humano, modificar el ambiente térmico o desplazarse a otro sitio para alcanzar el confort térmico. Por todo lo antes mencionado, se observa que este modelo es más realista que los modelos de predicción, ya que considera un rango más amplio y particular de variables para definir el nivel de confort de un individuo determinado en un ambiente dado.

Debido a la aceptación generalizada de este modelo, los enfoques basados anteriormente en los modelos cuantitativos, debieron ajustar sus procedimientos (Re et al., 2017) en su estudio sobre edificios educativos del área metropolitana de San Juan, demostraron que hay una variación entre los

datos empíricos y los obtenidos. Y que estas diferencias se deben a que los datos de actividad MET que toma la IRAM, no coincide con lo acontecido en aulas. Estos estudios sirvieron de base para la implantación del modelo adaptativo en el estándar ASHRAE 55 y en el EN UNE 15251. La expresión lineal (1) fue finalmente adoptada (Muñoz Godoy, 2012. pp,17).

$$T_{comf} = 0,31 \times T_{a,out} + 17,8 \quad (1)$$

Esta posibilidad de adaptabilidad térmica permite el diseño de edificios con rangos de temperatura menos rigurosos, y por lo tanto, una dependencia reducida del acondicionamiento mecánico, (siempre que los ocupantes tengan ventanas que puedan abrirse) (Van Der Linden, Boerstra, Raue, Kurvers, & De Dear, 2006).

Aplicación al clima de la Ciudad de Córdoba:

En términos generales, el clima de la ciudad de Córdoba es templado moderado con las cuatro estaciones bien definidas. Pampeano, de inviernos no muy fríos y poco lluviosos. Los veranos son húmedos, con días calurosos y noches frescas. En primavera soplan vientos principalmente del norte y el noreste. En el verano frecuentemente se producen tormentas eléctricas e incluso granizo. Según la norma IRAM 11603 (IRAM 11603, 1996a), se considera a ésta ciudad dentro de la zona bioambiental III a (Clima Templado Cálido), en la Tabla 1 se muestran los datos climáticos generales.

INVIERNO															
LAT	LONG	ASIM	TMED	TMAX	TMIN	TMA	TDMN	PREC	HR	HELRE	VM	GD16	GD18	GD20	GD22
-31.4	-64.18	425	13.46	19.9	7.1	-5.2	-2.9	45	66	5.8	4.2	463	738	1088	1526
VERANO															
LAT	LONG	ASIM	TMED	TMAX	TMIN	TMA	TDMN	PREC	HR	HELRE	VM	GD16	GD18	GD20	GD22
-31.4	-64.18	425	23.65	29.8	17.6	41.0	38.2	493	68	7.8	5.0				

Tabla 1: Datos clima Ciudad de Córdoba – IRAM 11603.(IRAM 11603, 1996b)

Por otra parte, dada la mediterraneidad, las variaciones o amplitudes térmicas son mayores que en la costa atlántica, siendo además menor la precipitación anual, de alrededor de 800 mm/año. Su temperatura media anual ponderada en todo el siglo XX fue de 18 °C. Las nevadas son poco frecuentes. Dada la extensión del conurbano, existe una diferencia de 5 °C o más entre el área céntrica y la periferia. El área céntrica, densamente edificada y ubicada en una depresión, es el núcleo de una importante isla de calor. (Alchapar, Correa, & Cantón, 2011)(Maristany, Abadía, Angiolini, Pacharoni, & Pardina, 2008)

Dadas las características climáticas de la Ciudad de Córdoba, donde el período estival es mucho más largo que el invernal. Sumado a que la ciudad está afectada por la isla de calor urbana, producto de la densidad poblacional, se puede considerar el período estival, comprendido entre los meses de noviembre a marzo. Se adopta este periodo considerando que tanto la ASHRAE 55 (ASHRAE STANDARD 55, 2004) cómo la EN UNE 15251 (UNE-EN 15251, 2008) refieren a que la aplicación del modelo de confort adaptativo es aplicable en aquellos espacios, que entre otras características, tiendan a sobrecalentarse. (Muñoz Godoy, 2012).

Para este periodo los datos de temperaturas fueron tomados de la estadística de parámetros climáticos promedio de Córdoba. Datos del período de referencia de la Fuerza Aérea Argentina, Comando Regiones Aéreas, Servicio Meteorológico Nacional, Estación Meteorológica Córdoba, (figura 3).

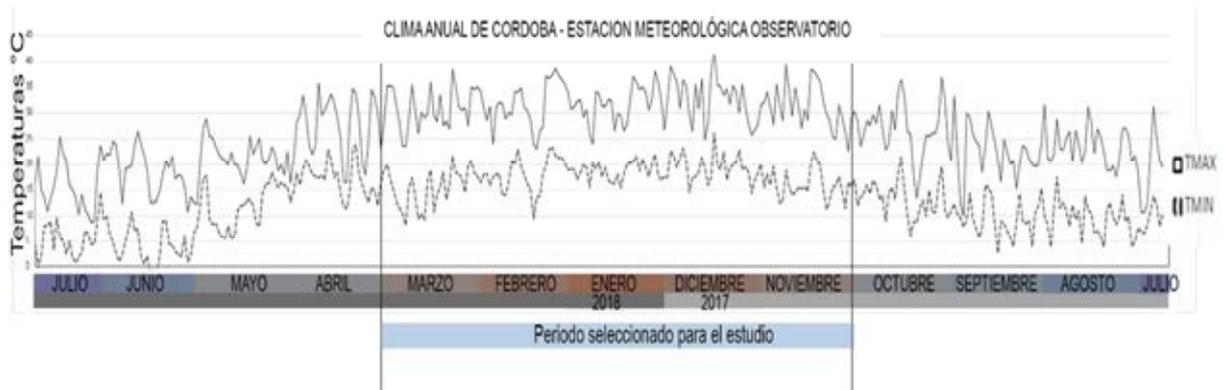


Figura 3: Gráfico de temperaturas anuales de Córdoba Capital – estación meteorológica Observatorio (julio 2017 a Julio 2018).

La temperatura a la cual puede esperarse que el mayor número de ocupantes considere la temperatura interior aceptable es lo que se conoce como temperatura operativa óptima (T_{co}) (UNE EN 15251, 2007). Es probablemente el factor más usado a la hora de trabajar sobre el confort en ambientes interiores. Es la temperatura a la que hay que tener el aire y las paredes de un recinto para que un individuo intercambie con él el mismo calor sensible que en el local de origen, utilizada como referencia para obtener las mínimas y máximas temperaturas que delimitaran un 90% de aceptabilidad por parte de los usuarios.

ASHRAE 55-2010 (1990) propone un método alternativo para determinar la temperatura operativa óptima en edificio naturalmente ventilados (2).

$$T_{co} = 0,31 \times T_{ref} + 17,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

Donde: T_{ref} = temperatura prevalente del aire exterior de 7 a 30 días después del día en cuestión. Tomando la temperatura media mensual exterior.

Mientras la EN 15251:2007 (2007), establece la siguiente fórmula para edificios naturalmente ventilados (3).

$$T_{co} = 0,33 \times T_{rm7} + 18,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

Donde: T_{rm7} = la media ponderada exponencialmente de la temperatura diaria al aire libre de los siete días anteriores en base a la ecuación. Tomando la temperatura media diaria exterior.

El cálculo de la temperatura externa media exponencial promedio de funcionamiento (T_{rm7}), se calculó según el procedimiento indicado en la UNE EN 15251 para relacionar temperatura exterior con temperatura interior (4). La norma indica que el modelo adaptativo es aplicable con unos valores de T_{rm7} entre 10 y 30 °C, por lo que se seleccionó una época donde este valor se mantuviera de manera diaria y continua entre esos niveles.

$$T_{rm7} = \frac{T_{i-1} + 0,8 T_{i-2} + 0,6 T_{i-3} + 0,5 T_{i-4} + 0,4 T_{i-5} + 0,3 T_{i-6} + 0,2 T_{i-7}}{3,8} \quad (4)$$

Donde: T_i = temperatura promedio exterior del día en cuestión

T_{i-n} = temperatura promedio exterior del día n anterior

En la gráfica de la figura 4 se muestran las variaciones de la T_{rm7} y su tendencia comparada con las temperaturas exteriores. A partir de estos valores de temperatura media exponencial promedio se calculó la temperatura operativa para Córdoba de acuerdo a los dos estándares (ISO 15251 y ASHRAE).

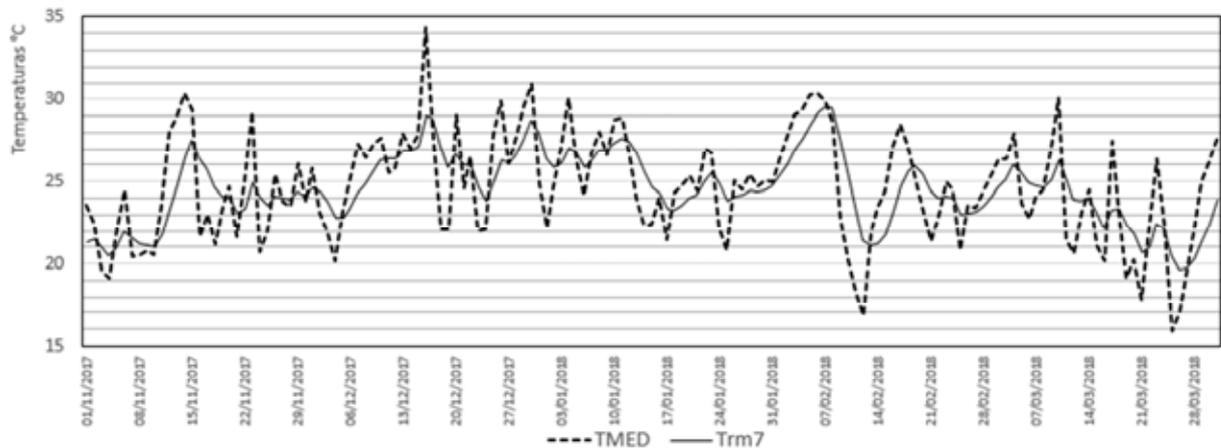


Figura 4: variaciones de la T_{m7} y temperatura media exterior para Córdoba. Elaboración propia.

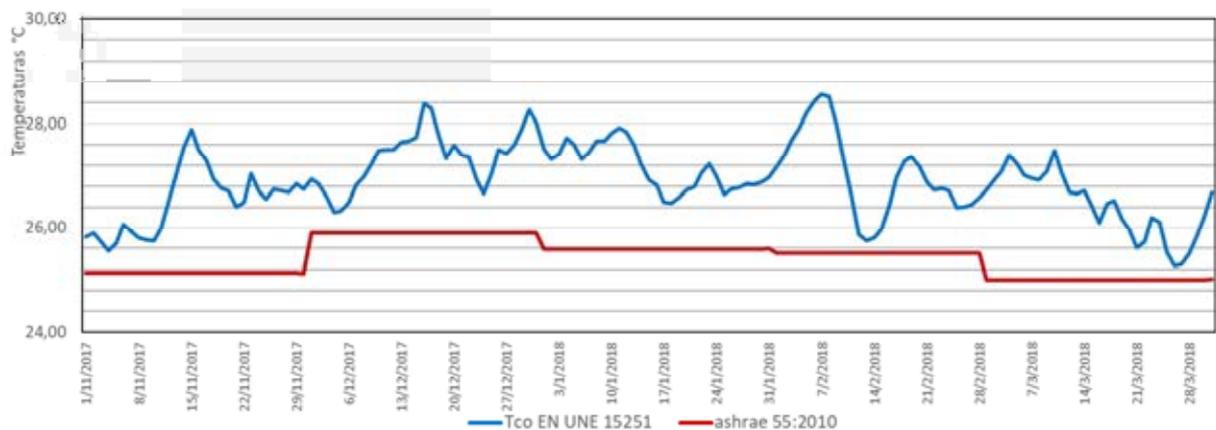


Figura 5: variaciones de la T_{co} según los dos modelos de confort adaptativo considerados. Elaboración propia.

En la ilustración anterior (Figura 5), se observa que, aunque ambos estándares se presentan como adaptativos respecto a la temperatura exterior, el hecho de que uno tome una media mensual y el otro diaria, hace que la relación con las variaciones térmicas diarias sea muy diferente. Es evidente que el criterio definido por la EN UNE 15251 sigue una tendencia de variación que permite definir márgenes de confort más precisos y con un ajuste dinámico a las condiciones de temperatura exterior. Estos rangos de confort, permiten ser cubiertos con recursos y estrategias de diseño de la envolvente arquitectónica, con aprovechamiento de la ventilación u otros recursos similares. De igual manera sería imposible alcanzar, por estos mecanismos, los estándares de confort dados por los criterios actualmente aceptados.

La IRAM 11659-1, (IRAM 11659-1, 2004) define como zona de confort, aquella cuyas condiciones de temperatura y humedad relativa brindan sensación de bienestar térmico a la mayor parte de los seres humanos. Los niveles de confort para verano en viviendas y locales habitables se establecen en 23°C (nivel A: recomendado), 26°C (nivel B: medio) y 27°C (nivel C: mínimo), con rangos de HR del 50 al 55%.

En la figura 6 se comparan los niveles de confort para el período de verano definidos por la IRAM 11659-1 en relación a las T_{co} propuestas por ambos modelos adaptativos. La línea de tendencia de las temperaturas de confort definidas según la EN UNE 15251 se corresponde, en este caso, de manera muy ajustada con el nivel C, mínimo, de confort, mientras que el nivel B, medio, se aproxima, como valor medio, a lo indicado por ASHRAE. Es importante destacar la gran diferencia de temperatura que existe entre el nivel de confort A, recomendado por IRAM, y la T_{co} establecida según la EN UNE 15251, alcanzando un valor medio de 4°C de diferencia para el periodo analizado.

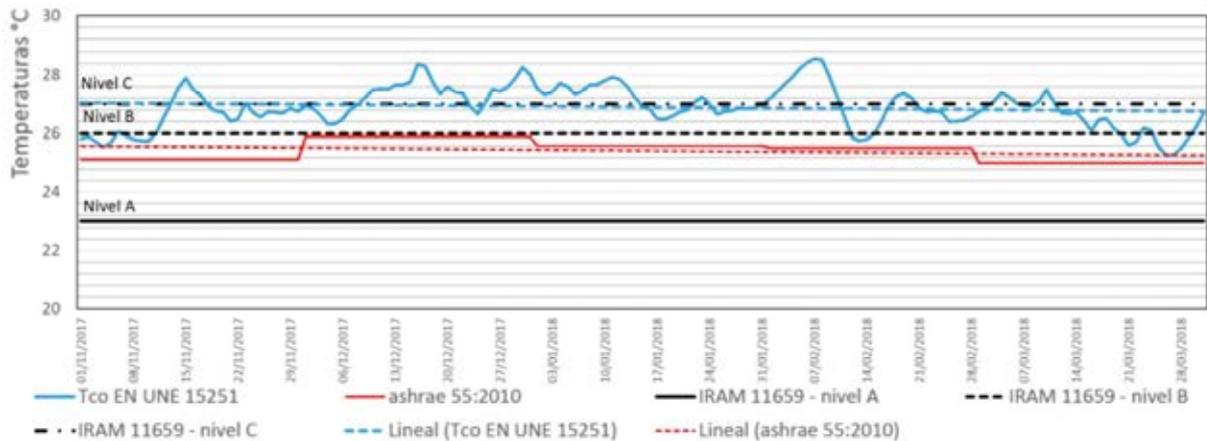


Figura 6: Niveles de Confort según IRAM 11659, comparación con T_{co} según los dos modelos de confort adaptativo para Córdoba. Elaboración propia.

Como menciona (Taleghani et al., 2013), los edificios pueden ser de dos tipos, de envolvente sellada o de envolventes con ventanas operables. En los edificios con ventanas operables, donde el clima interior puede adaptarse al exterior, se conseguirá un acercamiento a la zona de confort planteada por la normativa, pero acompañando las variaciones del clima exterior. Lo que no puede lograrse en los casos de edificios con fachadas selladas, donde las temperaturas están definidas independientemente del clima exterior, y por este motivo, son constantes. Tal como (Chávez del Valle, 2002, pp.8) menciona en su hipótesis: “el ambiente térmico dentro de un espacio arquitectónico debe tener variaciones temporales y espaciales parecidas, aunque en diferente escala, a las que se dan en el ambiente exterior. Esto para no generar estrés térmico por una exposición a condiciones demasiado estáticas, evitar contrastes térmicos excesivos entre el interior y el exterior y no perder la capacidad de adaptación o la tolerancia a los cambios en el ambiente”.

CONCLUSIONES

El incremento de la demanda energética de nuestras sociedades producto del aumento de la población mundial hace necesario aprovechar al máximo los recursos energéticos disponibles (Azqueta, 2014). Gran parte de dicha demanda proviene del sector residencial, por lo que el etiquetado de eficiencia energética de edificios ha cobrado gran importancia a nivel mundial, siendo necesario combinar el uso racional de la energía con construcciones sustentables. (Coronato, Navone, & Abalone, 2017). Frente a ésta creciente demanda de confort térmico en ambientes interiores residenciales, y los problemas que esta tendencia trae consigo, como lo es el consumo excesivo de energía, dando su real importancia al creciente y constante calentamiento global, y considerando que el ser humano tiene de forma innata la capacidad biológica de adaptarse a climas variados y sus fluctuaciones temporales. Se debe encontrar la forma de diseñar edificios residenciales adaptados al clima, que permitan mantener confortable al exigente usuario de la actualidad, sin involucrar la capacidad de adaptación.

En el gráfico 6, se demuestran 4°C de diferencia entre el nivel de confort “A: recomendado” por la norma IRAM, y la línea de tendencia según el enfoque adaptativo propuesto por la norma EN UNE 15251, esta diferencia es de suma importancia. De su análisis, decanta que es imposible en el período analizado (en el que las temperaturas medias exteriores van entre los 16°C y los casi 35°C) cubrir con sistemas adaptativos un nivel de confort actualmente recomendado por IRAM de 23°C, por lo que con ese paradigma instalado se cae la arquitectura natural como postulado. Por otro lado, si es posible

lograr niveles de confort adaptativo en edificios de envolventes también adaptativas, cuya línea de tendencia coincide con el nivel C: mínimo de confort según IRAM.

Quizás, sea necesario reflexionar acerca de dos aspectos. El primero, que en la zona bioclimática analizada, durante los meses de verano el nivel “C: mínimo” de confort que se pretende alcanzar dentro de edificios climatizados artificialmente sería en realidad el nivel “A: recomendado” si la arquitectura es de tipo adaptativo. Es decir, que el nivel óptimo de confort que se desea alcanzar sea diferente dependiendo del tipo de edificio. Pretendiendo alcanzar como niveles óptimos los 27°C en el caso de los edificios adaptativos y los 23°C en el caso de edificios climatizados artificialmente. Y como segundo punto, se debería revisar la línea de confort adaptativo de los edificios de envolventes operables, para que ésta se adapte a las fluctuaciones del clima exterior, dejando de ser un nivel de referencia lineal. Cabe aclarar que cuando se habla de sistemas de aire acondicionado, 4°C implican un gran consumo de recursos en una gran cantidad de población. “Ante la situación energético-económica y ambiental planteada, es primordial entonces que las viviendas que el Estado construya y/o financie sean energéticamente eficientes y propicien ambientes de confort higrotérmico, evitando así el derroche de recursos durante la vida útil de la edificación.”(Coronato et al., 2017. pp,109). Es fundamental que los criterios constructivos utilizados por todos los actores de la sociedad y en todas sus escalas (estado, instituciones, empresas e individuos) respondan a cada zona bioclimática, a cada orientación particular y a cada clima específico en sus fluctuaciones anuales, mensuales y diarias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Alchapar, N., Correa, E., & Cantón, M. (2011). COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE REVESTIMIENTOS VERTICALES, EN LA MITIGACIÓN DELA ISLA DE CALOR URBANA. ÍNDICE DE REFLECTANCIA SOLAR. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15(0329-5184), 55–64.
- ASHRAE STANDARD 55. (2004). THERMAL ENVIROMENTAL CONDITIONS FOR HUMAN OCCUPANCY.
- Balter, J., Ganem, C., & Discoli, C. (2013). AUDITORÍA TÉRMICO-ENERGÉTICA Y PERCEPCIÓN DE CONFORT EN EDIFICIOS EN ALTURA MÁSICOS Y LIVIANOS EN LA CIUDAD DE MENDOZA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1, 79–88.
- Banham Reyner. (2012). UN HOGAR NO ES UNA CASA, 1–8.
- Chávez del Valle, F. J. (2002). ZONA VARIABLE DE CONFORT TÉRMICO (Tesis doctoral). *Capitulo 2*, 36. Retrieved from <http://www.tdx.cat/handle/10803/6104>
- Coronato, T., Navone, H. D., & Abalone, R. (2017). EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA VIVIENDA DEL PLAN PROCREAR. PRIMERAS PROPUESTAS DE MEJORAS. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 58(10), 3375–3379.
- Cruz González, M. E., & Morales Bravo, C. G. (2009). SOBRE EL CONFORT TÉRMICO: TEMPERATURAS NEUTRALES EN EL TRÓPICO HÚMEDO. *Palapa*, IV(1870–7483), 33–38.
- Gómez-Azpeitia, G., Bojórquez Morales, G., & Pavel Ruiz Torres, R. (2007). EL CONFORT TÉRMICO: DOS ENFOQUES TEÓRICOS ENFRENTADOS/THERMAL COMFORT: TWO CONFRONTED THEORETICAL FOCUSES. *Palapa*, 2(1870–7483), 45–57. Retrieved from <http://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/palapa/article/view/43>
- IRAM 11603. (1996a). IRAM 11603: ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO EN EDIFICIOS. Clasificación bioambiental de la República Argentina. *Norma Argentina*.
- IRAM 11603. (1996b). IRAM 11603. ACONDICIONAMIENTO TERMICO DE EDIFICIOS. Clasificación Bio Ambiental de la República Argentina. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM 11659-1. (2004). AISLAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS Verificación de sus condiciones higrotérmicas Ahorro de energía en refrigeración. *Norma Argentina*, 1–36.
- Jara, P. (2015). THERMAL COMFORT AND ITS IMPORTANCE FOR THE ARCHITECTURAL DESIGN AND ENVIROMENTAL QUALITY OF INDOORS SPACES. *UTOPIATEORIARAXIS*, 7, 106–121.
- Kim, J., Schiavon, S., & Brager, G. (2018). PERSONAL COMFORT MODELS – A NEW PARADIGM IN THERMAL COMFORT FOR OCCUPANT-CENTRIC ENVIRONMENTAL CONTROL. *Building and Environment*, (January). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.023>

- Maristany, A., Abadía, L., Angiolini, S., Pacharoni, A., & Pardina, M. (2008). ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LA ISLA DE CALOR EN LA CIUDAD DE CÓRDOBA – resultados preliminares. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 69–75.
- Müller, E. (2002). MANUAL DE DISEÑO PARA VIVIENDAS CON CLIMATIZACIÓN PASIVA. Kassel, Alemania.
- Muñoz Godoy, A. (2012). EL CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO. APLICACIÓN EN LA EDIFICACION EN ESPAÑA. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Re, M. G., Filippin, C., & Blasco Lucas, I. (2017). NIVELES DE CONFORT TÉRMICO EN AULAS DE DOS EDIFICIOS ESCOLARES DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JUAN. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5, 97–108.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & Van Den Dobbelen, A. (2013). A REVIEW INTO THERMAL COMFORT IN BUILDINGS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>
- UNE-EN 15251. (2008). PARÁMETROS DEL AMBIENTE INTERIOR A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO Y LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS INCLUYENDO LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR, CONDICIONES TÉRMICAS, ILUMINACIÓN Y RUIDO. *Asociación Española de Normalización y Certificación*.
- UNE-EN ISO 7730. (2006). ERGONOMÍA DEL AMBIENTE TÉRMICO. DETERMINACIÓN ANALÍTICA E INTERPRETACIÓN DEL BIENESTAR TÉRMICO MEDIANTE EL CÁLCULO DE LOS ÍNDICES PMV Y PPD Y LOS CRITERIOS DE BIENESTAR TÉRMICO LOCAL (ISO 7730:2005). *AENOR*, 58.
- Van Der Linden, A. C., Boerstra, A. C., Raue, A. K., Kurvers, S. R., & De Dear, R. J. (2006). ADAPTIVE TEMPERATURE LIMITS: A NEW GUIDELINE IN THE NETHERLANDS: A NEW APPROACH FOR THE ASSESSMENT OF BUILDING PERFORMANCE WITH RESPECT TO THERMAL INDOOR CLIMATE. *Energy and Buildings*, 38(1), 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.02.008>
- Vargas, M. F., & Pulgarín Gallego, I. (2005). CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR: BIENESTAR, CONFORT Y SALUD. *Rev Esp Salud Pública*, 2, 243–251.
- Yang, L., Yan, H., & Lam, J. C. (2014). THERMAL COMFORT AND BUILDING ENERGY CONSUMPTION IMPLICATIONS - A review. *El Sevier*, 115, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>

ABSTRACT:

Many authors refer to hygrothermal comfort in their research throughout history, and varied the definitions of this concept. In general, all of them refer to the absence of thermal discomfort or sensation of thermal comfort, placing special emphasis on the perception of people. Currently, two models coexist that predict their quantification. The thermal balance model (based on laboratory studies) and the adaptive model (based on field studies). Having significantly changed people's comfort pretensions while the constructive criteria of residential architecture remain more or less constant, significantly increasing the energy consumption of cities. In this work, a review of the evolution of the comfort paradigm from the 60's to the present will be elaborated and the impact it will have on architecture and residential energy consumption will be described according to the model of comfort finally adopted.

Keywords: Comfort paradigm, climate adapted architecture, energy efficiency.

EVALUACIÓN TÉRMICA DE VIVIENDA RURAL BIOCLIMÁTICA EN TIERRA CRUDA CON DINÁMICA DE FLUIDOS

M. Cúnsulo¹ C. Martínez²

Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental “Arq. Alberto Papparelli” (INEAA)
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD) – Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)
Santa Fe 198 Oeste 1° Piso, J5400ZAA San Juan.
Tel (0264) 4202664 e-mail: mcunsulo@unsj.edu.ar

Recibido 11/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: Se estudia el comportamiento térmico de un domo geodésico construido en tierra cruda, con materiales reciclados de bajo costo. Se verifican variables climáticas locales relacionadas con el confort térmico de la vivienda durante el verano, mediante la modelización de escenarios con diferentes condiciones iniciales, complementada con la simulación térmica realizada en un proyecto de investigación precedente.

Se evalúa el comportamiento térmico estival con dinámica de fluidos, se valida y complementa el resultado de la modelización del comportamiento térmico de la vivienda citado y se confirman las ventajas de utilizar la oferta ambiental del sitio: clima, materiales locales y de amplia disponibilidad, costumbres vernáculas, etc. como aporte a la resolución de viviendas sociales rurales, con enfoque bioclimático y sostenible, tendientes a la auto-construcción guiada.

Palabras clave: Modelización fluido-dinámica, Domo en tierra cruda, Confort bioclimático, Zonas áridas.

INTRODUCCION

El trabajo se inserta en la disciplina Diseño Arquitectónico Bioclimático, particularizado en el estudio de la vivienda social en área rural de zona árida con la utilización de materiales naturales-ecológicos y reciclados, en este caso situada en el Departamento de Albardón, en la Provincia de San Juan. Constituye un avance respecto del trabajo expuesto en la reunión de ASADES 2017 denominado: “Diseño y simulación térmica de vivienda rural bioclimática en tierra cruda” (Cúnsulo M., Matar M., 2017). En él se presentó el diseño de una vivienda rural, de acuerdo con los condicionantes ambientales de la zona de implantación, se describieron los materiales y tecnología utilizados y se simuló su comportamiento térmico a partir de la aplicación del software SIMEDIF (Flores Larsen, *et al.*, 2012). El domo geodésico bioclimático en tierra cruda se encuentra localizado en un área no urbana del departamento Albardón a 11Km de la capital de la Provincia de San Juan, (Lat. -31°26', Long. -68° 30' y 627msnm). La necesidad de evaluar científicamente desde el punto de vista térmico este tipo de edificaciones se fundamenta en la siempre presente y creciente demanda al derecho a una vivienda digna, y en la falta de respuestas energéticamente responsables, sin criterios de sostenibilidad, diseño y tecnologías apropiadas ni apropiables.

La vivienda conforma un sistema constructivo posible de ser ejecutado por auto-construcción guiada y de bajo mantenimiento, con tecnologías y materiales alternativos, haciendo un aporte superior de las soluciones vigentes, en cuanto al confort térmico y adaptabilidad climática, con bajo impacto ambiental, tanto en su ejecución como en su eventual desmontaje. Los materiales utilizados son rollizos de eucaliptos como postes y vigas-columnas que conforman la estructura resistente del domo

¹ Profesor Adjunto FAUD-UNSJ; Profesional Principal CONICET

² Becario Doctoral CONICET

geodésico. Las uniones entre elementos se realizan mediante piezas metálicas diseñadas especialmente para cada caso según la cantidad de elementos que confluyen a cada nudo.

Los muros, confinados entre puntales, consisten en un paquete conformado por dos entablados de eucaliptus a junta abierta de 3cm de separación entre tablas, rellenos con botellas PET³ vacías. El conjunto se revoca interior y exteriormente con barro estabilizado con jugo de tuna y una parte de arena. Los muros poseen un arriostramiento inferior de hormigón armado entre dichos puntales para evitar su desplazamiento ante fuerzas sísmicas. En las Figuras 1, 2, y 3 se muestran la planta y dos cortes del domo geodésico en estudio.

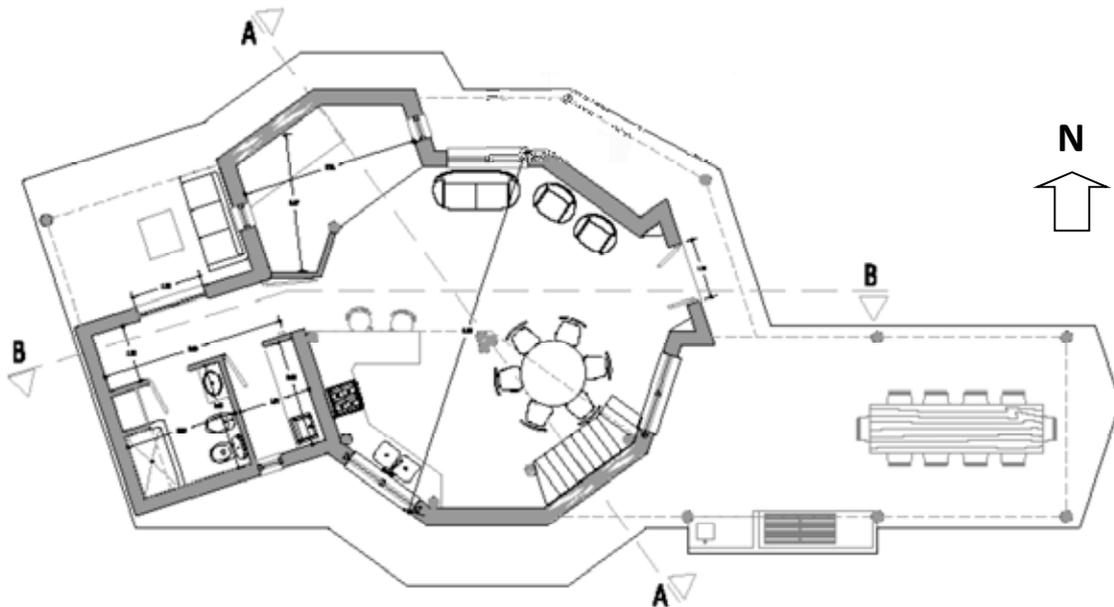


Figura 1: Planta de la vivienda

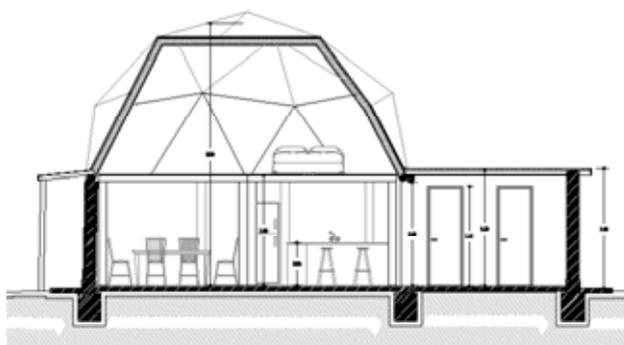


Figura 2: Corte A-A de la vivienda



Figura 3: Corte B-B de la vivienda

Para este trabajo se amplió la base de datos climática disponible (período 1992-2010) con datos del período 2014-2016. Se verificaron las estrategias de diseño bioclimáticas para esta nueva información meteorológica y se realizó una simulación fluidodinámica de la vivienda (estado estacionario) mediante el uso de Autodesk Simulation CFD, utilizando como condiciones de contorno la información climática disponible de los meses de diciembre, enero y febrero. Se aplicaron condiciones iniciales (de acuerdo con dicha información climática) para conformar los distintos escenarios en los cuales se evaluó el comportamiento del modelo de vivienda. Los resultados obtenidos de la simulación se complementan con los resultados obtenidos en un trabajo anterior (Cúnsulo M., Matar M., 2017).

³ PET: polietileno tereftalato

ARCHIVO DE DATOS CLIMÁTICOS

La base de datos utilizada inicialmente, consistió en registros de estaciones meteorológicas instaladas en diferimientos impositivos de la zona de implantación de la obra, correspondientes al período 1992-2010. Estos se complementaron en el actual trabajo, con las provenientes de la estación meteorológica propiedad del INEAA (Unidad Ejecutora), instalada en zona No Urbana. Los parámetros estudiados fueron temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar global, durante las estaciones climáticas de verano (diciembre – enero – febrero) e invierno (junio – julio – agosto).

En este avance, la base de datos anterior se amplió con los registros de los años 2014-2016 de los citados diferimientos impositivos. A los parámetros estudiados anteriormente, se le agregó el viento: dirección y velocidad, registrado para la estación verano (diciembre - enero – febrero) información fundamental como insumo de la posterior modelización fluidodinámica del modelo.

Análisis comparativo entre períodos de registro

Procesados los valores de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar global promedio para el período ampliado (1992-2010 y 2014-2016) se manifiestan diferencias despreciables (en el tercer decimal) con respecto a los obtenidos inicialmente. En la Figura 4, se muestra la variación horaria (para HSV) de Temperatura del Aire para verano e invierno; en la Figura 5 la correspondiente a Humedad Relativa y en la Figura 6 la de Radiación Solar Global.

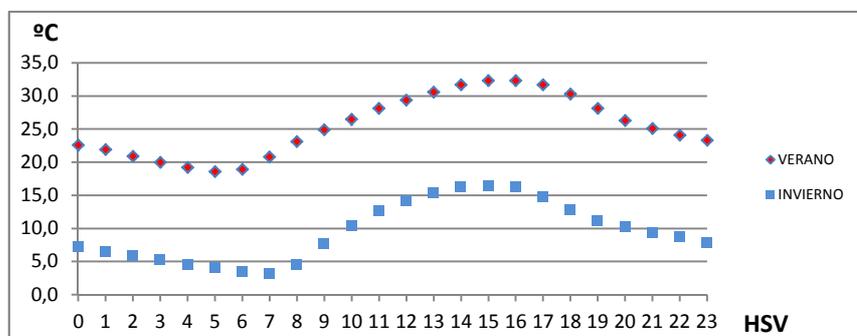


Figura 4: Modelización estacional de Temperaturas

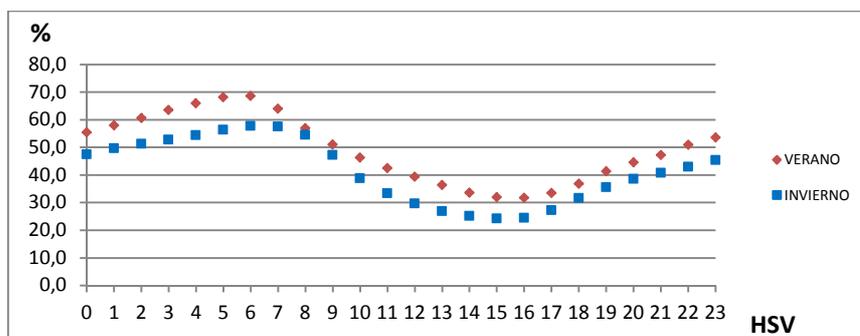


Figura 5: Modelización estacional de Humedad Relativa

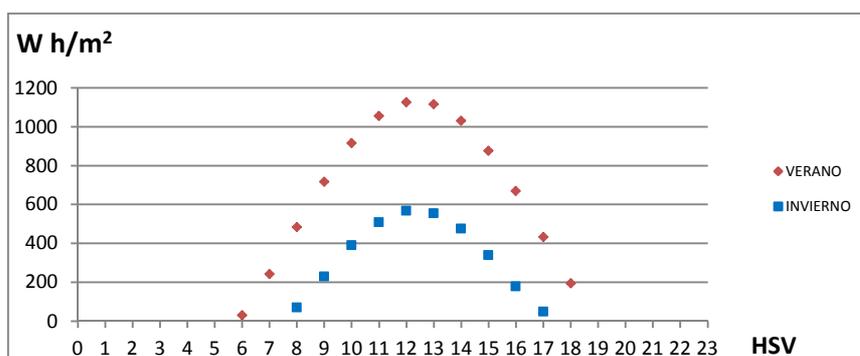


Figura 6: Modelización estacional de Radiación Solar Global

Los valores horarios (HSV) y estacionales (Ver. e Inv.) resultantes se presentan en Tablas 1 y 2.

VERANO			INVIERNO		
HSV	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	HSV	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
0	22,6	55,4	0	7,2	47,4
1	21,9	57,9	1	6,6	49,6
2	20,9	60,6	2	5,9	51,3
3	20,0	63,5	3	5,3	52,8
4	19,2	65,9	4	4,6	54,4
5	18,6	68,1	5	4,1	56,3
6	18,9	68,6	6	3,5	57,7
7	20,8	64,0	7	3,2	57,5
8	23,1	56,9	8	4,6	54,5
9	24,9	51,0	9	7,7	47,2
10	26,5	46,3	10	10,5	38,8
11	28,1	42,5	11	12,6	33,3
12	29,4	39,3	12	14,2	29,6
13	30,6	36,3	13	15,4	26,9
14	31,7	33,6	14	16,2	25,1
15	32,3	31,9	15	16,5	24,2
16	32,3	31,7	16	16,2	24,5
17	31,7	33,4	17	14,8	27,2
18	30,3	36,8	18	12,8	31,6
19	28,1	41,3	19	11,2	35,5
20	26,3	44,6	20	10,2	38,5
21	25,1	47,2	21	9,4	40,7
22	24,1	50,9	22	8,7	42,9
23	23,3	53,5	23	7,9	45,3

Tabla 1: Valores de temperatura y humedad relativa promedios para verano e invierno en Albardón, para cada hora solar verdadera (HSV). Período (1992-2010 y 2014-2016).

PERÍODO	HSV												
	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
R_G prom Ver. (W h/m²)	31,9	244,2	485,2	718,8	916,5	1056,8	1126,0	1117,4	1031,9	877,8	670,6	433,4	196,5
R_G prom Inv. (W h/m²)			70,9	231,2	391,6	510,3	568,7	554,8	476,4	340,4	179,1	50,0	

Tabla 2: Valores de R_G promedio (W h/m²) para invierno y verano en Albardón, para cada hora solar verdadera (HSV). Período (1992-2010 y 2014-2016).

VERIFICACION DE LAS ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOCLIMATICO

Metodológicamente, para conocer la cantidad de horas anuales en las que se necesita acondicionar bioclimáticamente una vivienda, se aplica el método analítico desarrollado por Cúnsulo, M. (2014) el que se basa en el método gráfico de D. Watson *et al.* (1983) y que consiste en incorporar en la Carta Bioclimática Edilicia, la temperatura y humedad relativa promedio para las 24 horas de los 365 días del año.

Se estima adecuado re-calcular las estrategias bioclimáticas estivales e invernales determinadas en Cúnsulo y Matar (2017) por ser estas estaciones las más rigurosas del clima macroescalar, con inviernos fríos y veranos calurosos.

En las Figuras 7 y 8 se presentan las estrategias resultantes del procesamiento de datos climáticos ampliados, para ambas estaciones climáticas.

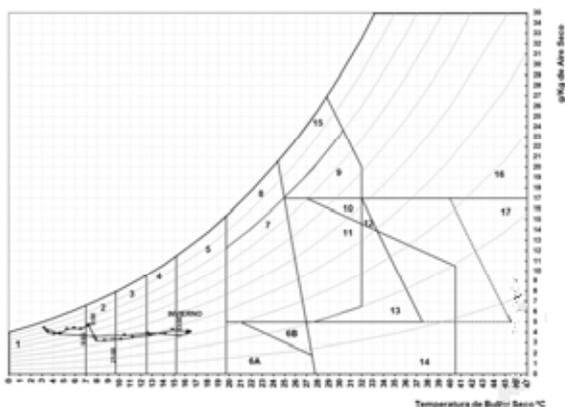


Figura 7: Invierno.

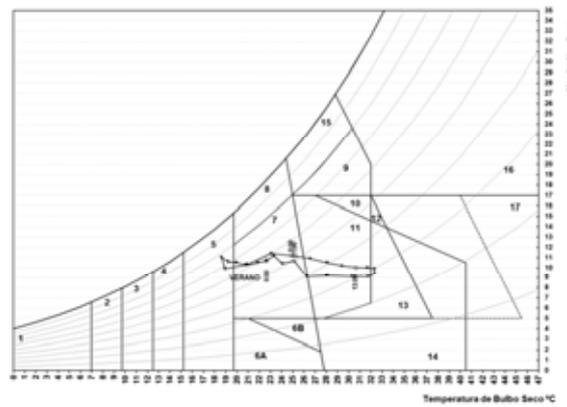


Figura 8: Verano

El resultado analítico del cálculo de Estrategias Bioclimáticas se muestra en las Tablas 3a y 3b para invierno y verano respectivamente.

3a Invierno		
Estrategia	Horas	%
Zona 1	8	33,3
Zona 2	5	20,8
Zona 3	3	12,5
Zona 4	4	16,7
Zona 5	0	16,7
Zona 6A	0	0,0
Zona 6B	0	0,0
Zona 7 (Confort)	0	0,0
Zona 11	0	0,0
Zona 13	0	0,0
Zona 14	0	0,0
Zona 17	0	0,0
TOTAL	24	100,0

3b Verano		
Estrategia	Horas	%
Zona 1	0	0,0
Zona 2	0	0,0
Zona 3	0	0,0
Zona 4	0	0,0
Zona 5	3	12,5
Zona 6A	0	0,0
Zona 6B	0	0,0
Zona 7 (Confort)	11	45,8
Zona 11	8	33,3
Zona 13	2	8,3
Zona 14	0	0,0
Zona 17	0	0,0
TOTAL	24	100,0

Tabla 3: Cantidad de horas anuales por Estrategias Bioclimáticas. 3a de Invierno y 3b de Verano

SIMULACIÓN FLUIDO-DINÁMICA DE LA VIVIENDA

Se consideran las condiciones de ventilación nocturna como herramienta y estrategia bioclimática de refrescamiento en verano (Zona bioclimática 11), la cual constituye el 33,3% de las horas del día. El enfriamiento radiante (Zona bioclimática 13, 8,3%) se consigue abriendo las ventanas cenitales del domo durante la noche. A partir de la documentación precedente, se ejecuta un modelo digital tridimensional representativo del domo geodésico utilizando un software de diseño asistido por computadora, cuidando la precisión, ya que el modelo CFD no admite incongruencias de borde, es decir, no permite ninguna superposición ni hendidura en el mismo. Se genera el modelo del domo con caras sin espesor y luego se procede a extruirlo hacia afuera para evitar superposiciones de elementos. Se conforma de este modo el diseño volumétrico a modelizar.

La vivienda se evalúa con herramientas informáticas de simulación fluidodinámica como el software Autodesk Simulation CFD. Para el invierno, el modelo no es aplicable ya que se supone que las aberturas permanecen cerradas y no existe circulación de aire desde el exterior. En el análisis para verano se consideran dos escenarios posibles en la situación de apertura de puertas y ventanas:

- Escenario **E1**: corresponde a todas las puertas y ventanas totalmente abiertas.
- Escenario **E2**: corresponde a puertas cerradas y la abertura superior del domo que mira hacia el norte también cerrada; el resto todo abierto.

En cada escenario se plantean dos situaciones de velocidad de vientos del sur (viento dominante) de 5km/h y 10km/h (velocidad promedio y máxima respectivamente) entrando por las respectivas aberturas. Se calcula la componente normal al plano de cada abertura. Las alturas consideradas en la simulación se corresponden con las actividades que se desarrollarán en el interior del domo: en el nivel inferior, a la altura de 1,5m para una persona de pie; otra a 0,50m para una persona sentada. Para el entrepiso se simula a una altura 0,5m por encima del entrepiso correspondiente a la ubicación sobre la cama. Los resultados se muestran en planos ubicados a: 0,5m; 1,5m y 3m desde el nivel de piso de Planta Baja. En las Figuras 9 a 16, para el escenario **E1** y Figuras 17 a 24 para el escenario **E2**. Además se muestra para cada escenario y cada caso de estudio, una vista (norte) del plano de corte vertical central del domo. (Figuras 15 y 16 para el escenario **E1**; Figuras 23 y 24 para el escenario **E2**).

Escenario **E1**

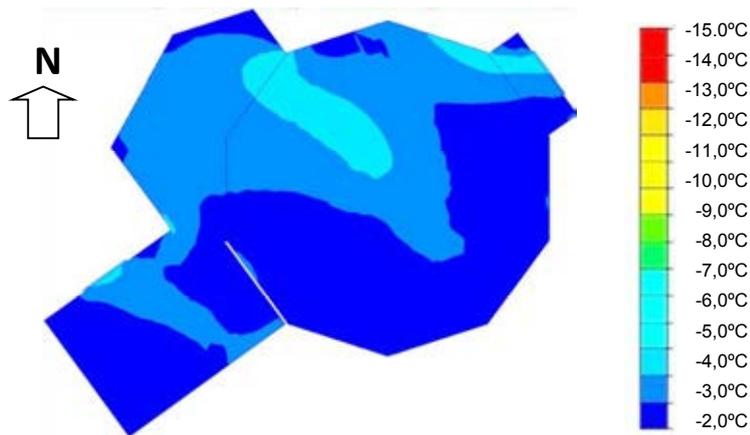


Figura 9: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 0,5m desde el nivel de piso; $v=5\text{Km/h}$ – **E1**

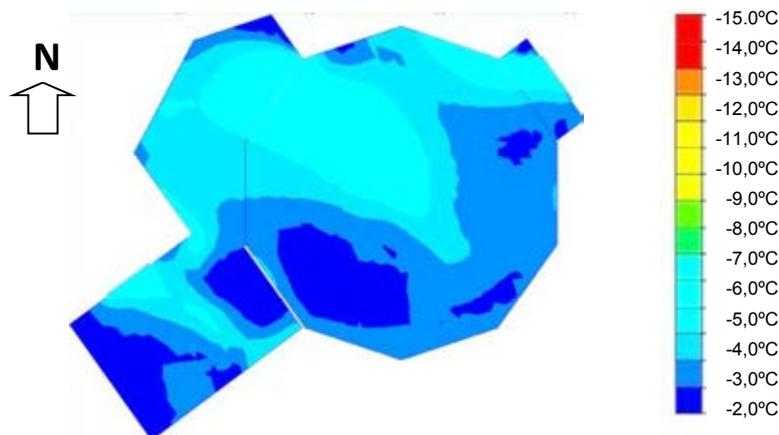


Figura 10: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 0,5m desde el nivel de piso; $v=10\text{Km/h}$. – **E1**

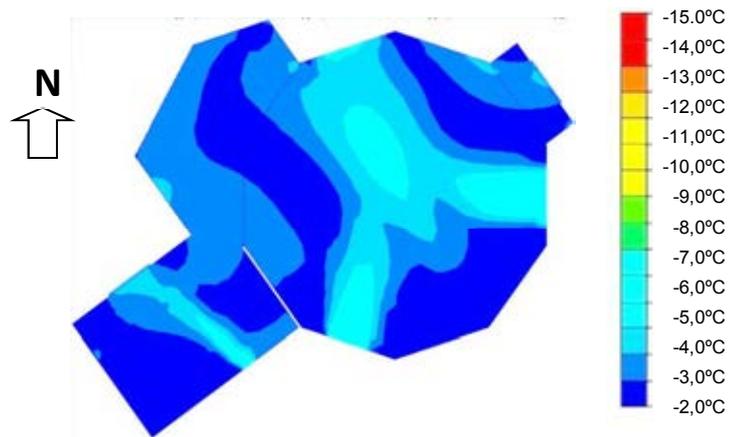


Figura 11: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 1,5m desde el nivel de piso; $v=5\text{Km/h}$. – E1

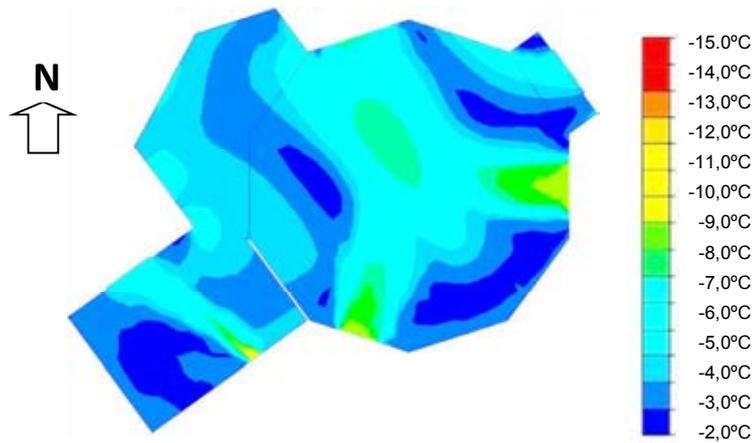


Figura 12: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 1,5m desde el nivel de piso; $v=10\text{Km/h}$. – E1

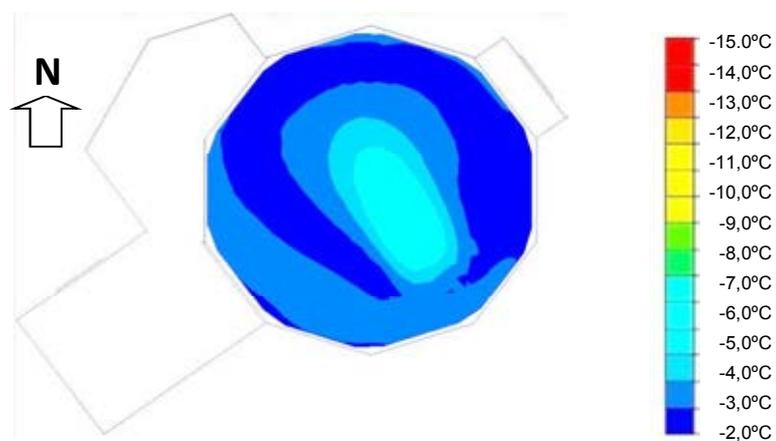


Figura 13: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 3,0m desde el nivel de piso; $v=5\text{Km/h}$. – E1

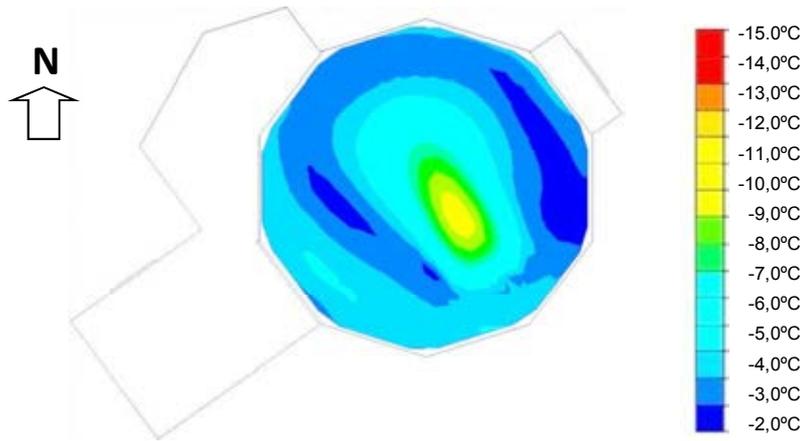


Figura 14: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 3,0m desde el nivel de piso; $v=10\text{Km/h}$. – E1

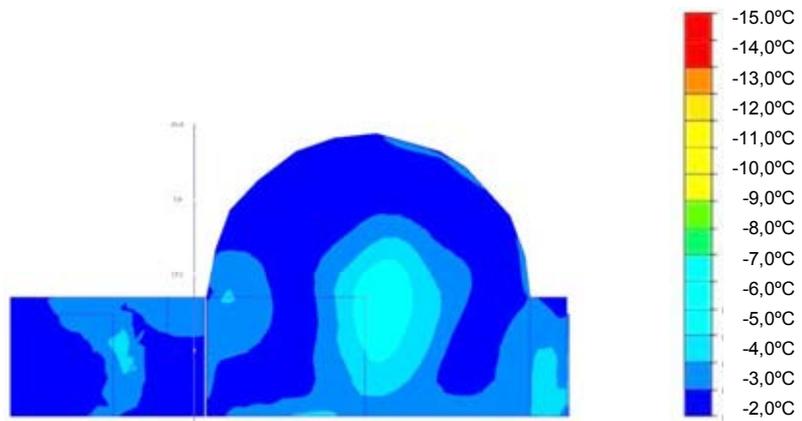


Figura 15: Esquema de distribución del aire dentro del domo. Corte vertical; $v=5\text{Km/h}$. – E1

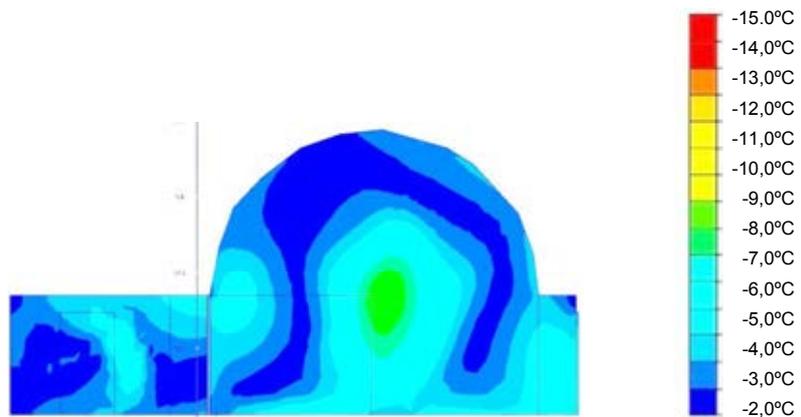


Figura 16: Esquema de distribución del aire dentro del domo. Corte vertical; $v=10\text{Km/h}$. – E1

Escenario E2

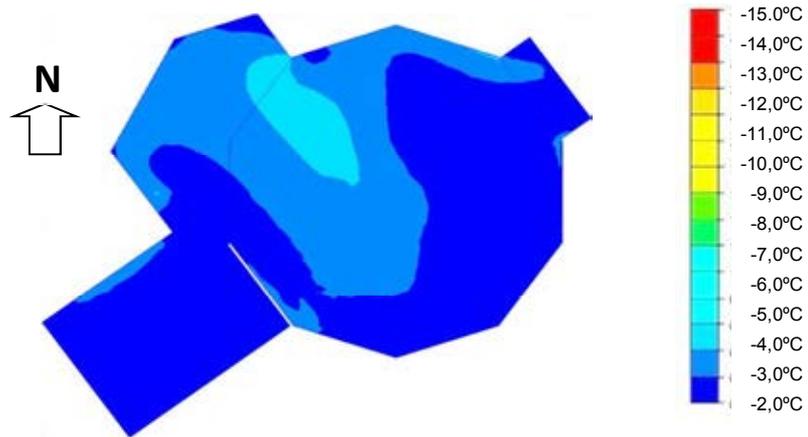


Figura 17: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 0,5m desde el nivel de piso; $v=5\text{Km/h}$. – E2

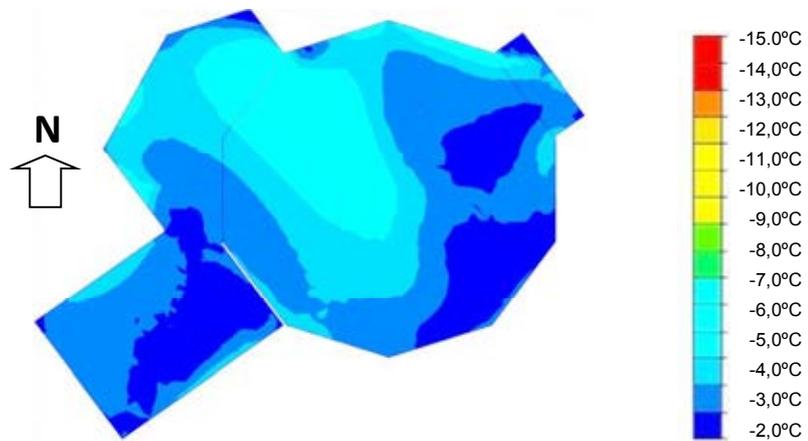


Figura 18: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 0,5m desde el nivel de piso; $v=10\text{Km/h}$. – E2

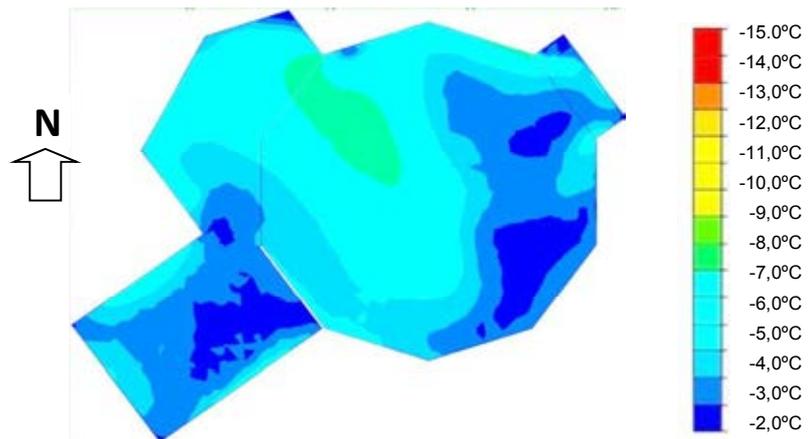


Figura 19: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 1,5m desde el nivel de piso; $v=5\text{Km/h}$. – E2

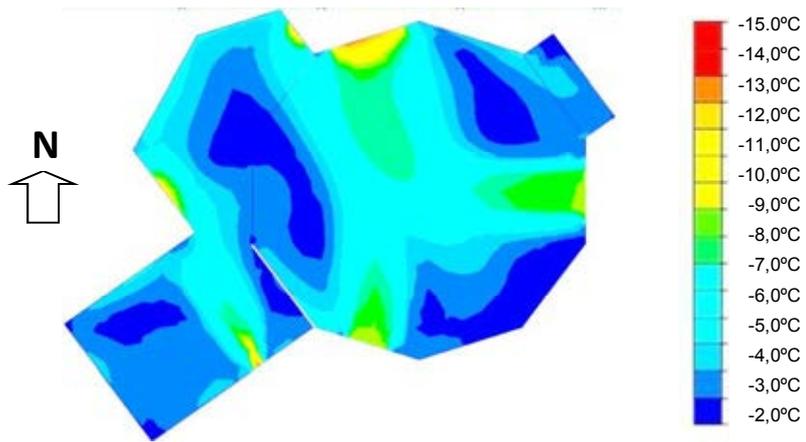


Figura 20: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 1,5m desde el nivel de piso; $v=10\text{Km/h}$. – E2

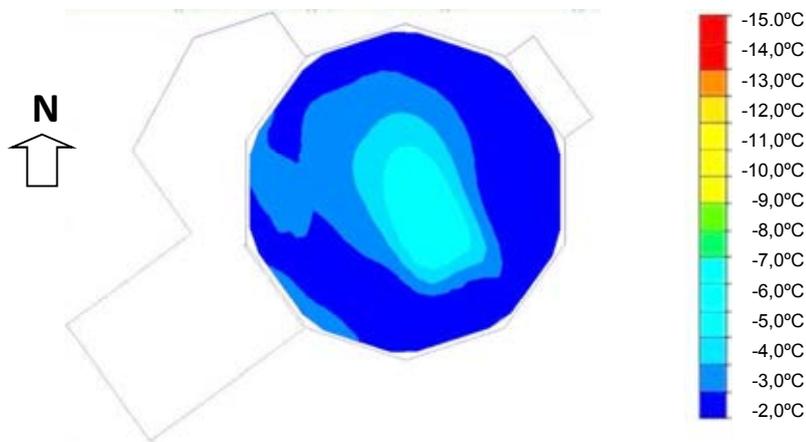


Figura 21: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 3,0m desde el nivel de piso; $v=5\text{Km/h}$. – E2

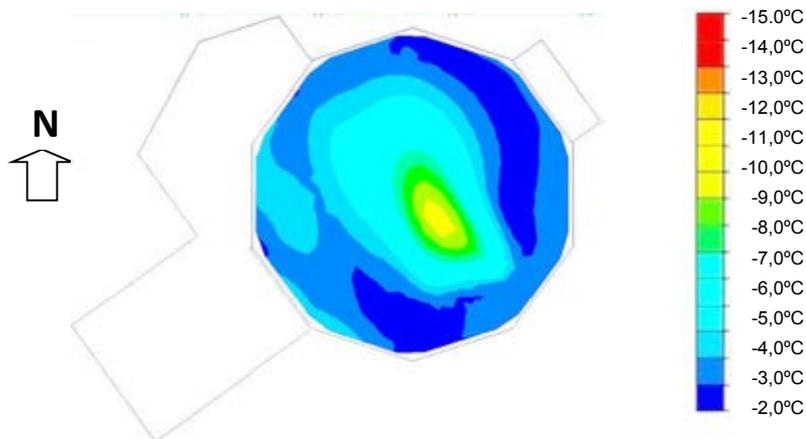


Figura 22: Esquema de distribución del aire dentro del domo a 3,0m desde el nivel de piso; $v=10\text{Km/h}$. – E2

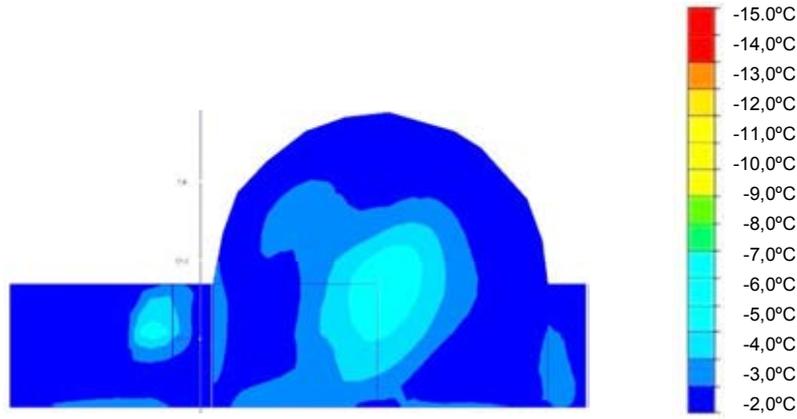


Figura 23: Esquema de distribución del aire dentro del domo. Corte vertical; $v=5\text{Km/h}$. – E2

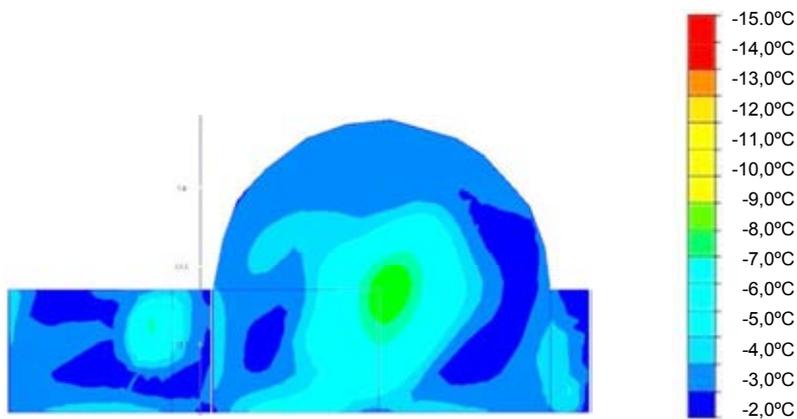


Figura 24: Esquema de distribución del aire dentro del domo. Corte vertical; $v=10\text{Km/h}$. – E2

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En verano, la ventilación de las viviendas puede mejorar las condiciones de confort a través de dos maneras: ventilación natural directa sobre las personas, denominada Ventilación de Confort y ventilación sobre la masa interna del edificio, que también se denomina Ventilación Nocturna (por las horas más propicias para realizarla). Ambas son consideradas Sistemas Pasivos de Refrescamiento, basados en la potencial capacidad térmica del aire en movimiento (Yarque, 2005).

Neila y Bedoya (2001) establecen una correlación entre la velocidad del aire y el descenso de temperatura efectiva. Esta correlación está referida a unidades de velocidad en m/seg, motivo por el cual, las modelizaciones se realizan en estas unidades. La sensación de refrescamiento es de 1°C por cada $0,2\text{m/s}$ de velocidad del aire. Las escalas gráficas a la derecha de las Figuras 9 a 24, muestran que cada superficie de color equivale a saltos de 1°C . El límite al que la velocidad del aire llega a ser incómodo, se sitúa entre $1,1\text{m/s}$ y $1,2\text{m/s}$. Con esta velocidad puede llegarse a una temperatura efectiva 6°C menor que la temperatura del aire de bulbo seco.

En la modelización realizada (Cúnsulo y Matar, 2017) mediante el software SIMEDIF (Flores Larsen, *et al.*, 2012) la máxima diferencia entre la temperatura exterior y el espacio principal es de 6°C , valor que también se verifica en la modelización fluido-dinámica del Escenario 2 para velocidades de viento de 10Km/h (Figura 20), a $1,5\text{m}$ de altura, valor levemente superior al que se alcanza en el Escenario 1 en las mismas situaciones (Figura 12). También en los perfiles verticales se muestra esta reducción de temperatura, especialmente en el centro del espacio principal.

Para una velocidad del aire de 5Km/h, la reducción de la temperatura sensible es un poco inferior, aproximadamente 4°C, lo cual hace ingresar las condiciones ambientales a la Zona de Confort.

En los cortes a 3m de altura, donde está situado el plano de reposo del dormitorio, en el entresuelo, las condiciones que se presentan también se muestran con reducciones importantes (de 3°C a 4°C) que hacen que resulten confortables en ese sector, con velocidad del aire de 10Km/h (Figuras 22 y 24). Con velocidad del aire de 5Km/h, la sensación térmica se reduce entre 1°C y 3°C.

CONCLUSIONES

El análisis permite evaluar la distribución del flujo de aire dentro de la vivienda, sin tener en cuenta las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en los cerramientos. Esto limita el campo de aplicabilidad a situaciones donde la ventilación de confort y la ventilación nocturna son estrategias importantes de refrescamiento durante el verano, como es el caso de estudio.

Las simulaciones fluido-dinámicas confirman los resultados a los que se arribó para esas condiciones con la modelización térmica cuantitativa (Cúnsulo y Matar, 2017) mediante el software SIMEDIF (Flores Larsen, *et al.*, 2012) tanto en el efecto de refrescamiento como en la intensidad del mismo.

Este tipo de estudios permite visualizar las zonas donde el efecto de refrescamiento se produce con menor y mayor intensidad. Esto posibilita la toma de medidas en cuanto a disposición y dimensiones de las aberturas, de modo que sean eficientes, principalmente en verano.

La masa térmica y las aislaciones incorporadas al diseño completan el resto de las horas del día con condiciones de confort térmico en el domo, durante el verano. Son también los elementos que proveen condiciones de confort durante el invierno.

REFERENCIAS

- Cúnsulo M. (2014) Determinación analítica de las Estrategias de Diseño Bioclimático de acuerdo con el método de D. Watson. En Proyecto de Investigación Científica y Técnica Orientado – PICTO 2009 N° 0002. ANPCyT-SECYT y UNSJ. Res. N199/11.
- Cúnsulo M., Matar M. (2017) Evaluación Térmica de vivienda bioclimática construida en tierra cruda usando materiales reciclados. AVERMA Vol. 20, pp 05.25 a 05.36. Salta. ISBN 978-987-29873-0-5
- Flores Larsen S., Lesino G., Saravia L. (2012) SIMEDIF - Programa de Diseño y Cálculo. INENCO. UNSa-CONICET.
- Neila F., Bedoya C. (2001). Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. 2° Edición Murilla - Lería. Madrid.
- Watson, D., Faia y Kenneth Labs. (1983) Climatic Design. Ed. Mc. Graw-Hill Book Company. USA.
- Yarque E. (2005). Ventilación Natural de Edificios. ISBN 987-584-036-X. Ed. NOBUKO. Bs. As.

ABSTRACT

The thermal behavior of a geodesic dome built in raw land, with low-cost recycled materials is studied. The different local climatic components and their correlations with the thermal comfort of the house during the summer were checked, through the modeling of scenarios with different initial conditions, complemented with the thermal simulation made in a previous work.

Summer thermal behavior with fluid dynamics was evaluated; the results of modeling the thermal behavior of the house was validated and supplemented, and the advantages of using local materials widely available were confirmed as a contribution to the resolution of rural sustainable social housing, focused on bioclimatic and guided self-build.

Keywords: Fluid-dynamic modeling, raw land dome, bioclimatic comfort, arid zone.

MODELO ANALITICO PARA ESTIMAR EL CONSUMO ENERGÉTICO PARA CLIMATIZACIÓN DE VIVIENDAS EN RÉGIMEN DINÁMICO. PARTE 2: REQUERIMIENTO DE ENERGÍA PARA CALEFACCIÓN DE UNA VIVIENDA PARA UN MES ESPECÍFICO

R. Stagnitta^{1,3}; A. Gastón^{1,2} y R. Abalone^{1,2}

¹ Fac. de Cs. Exactas Ingeniería y Agrimensura (UNR). IFIR (CONICET/UNR)

² Consejo de Investigaciones (CIC- UNR)

³ Secretaría de Estado de la Energía, Provincia de Santa Fe
rstagnitta@santafe.gov.ar. Av. Pellegrini 250. (2000) Rosario. Argentina

Recibido 13/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: La necesidad de elaborar un procedimiento nacional de etiquetado de eficiencia energética de inmuebles invita a validar modelos de cálculo de requerimientos de energía para climatización. Se propone un modelo eléctrico equivalente que se resuelve de manera analítica considerando las variables temperatura y radiación como superposición de funciones senoidales. En este trabajo se determina el requerimiento de energía para calefacción de una vivienda para un mes de julio para la ciudad de Rosario. Dicho mes está caracterizado por tres días típicos (cálido, frío, nublado) con cierta ocurrencia. Los resultados obtenidos se comparan con una simulación numérica con COMSOL Multiphysics. Las diferencias entre ambos métodos no superan el 3% para el mes completo, validando el método propuesto para la estimación de los requerimientos energéticos de una vivienda y los “factores de corrección dinámicos” que contempla el Procedimiento de Cálculo del Índice de Prestaciones Energéticas y a la norma IRAM 11900:2017.

Palabras clave: modelo analítico, requerimiento energético, viviendas

INTRODUCCIÓN

El reciente cambio de contexto en el sector energético argentino, especialmente en lo referido a la actualización tarifaria introduce en nuestro país el paradigma de la eficiencia energética, que si bien a nivel global es una tendencia consolidada desde hace ya varias décadas, a nivel local, producto del poco peso relativo de los costos de energía en los usuarios finales residenciales e industriales, no se ha instalado lo suficiente. En cambio, en este nuevo contexto la eficiencia energética como forma de sustituir producción y generación de energía encontraría un terreno fértil.

Es necesario entonces de parte de los organismos del estado elaborar políticas públicas tendientes a su fomento de manera de direccionar el mercado hacia soluciones que globalmente arrojen el mayor beneficio global.

Particularmente, el gran porcentaje de la energía que consume en el sector residencial está ligada a necesidades de calefacción y refrigeración de ambientes, estando esta demanda configurada por las características de diseño de la vivienda, envolvente y equipamiento activo instalado. Resulta entonces fundamental brindar al mercado inmobiliario un instrumento claro de información respecto de la eficiencia energética de una vivienda. Los sistemas de etiquetado se constituyen a nivel mundial como los instrumentos de información que facilitan la decisión a la hora de realizar una operación inmobiliaria. En nuestro país, a partir del Decreto 140/2007, se establecieron sistemas de etiquetado de eficiencia energética de electrodomésticos y gasodomésticos con amplia aceptación en el mercado.

En nuestro país existen diversos proyectos de etiquetados de viviendas, siendo pionero el proyecto de ley de la Provincia de Santa Fe en donde se realizó a partir de marzo de 2017 la primera prueba piloto

de etiquetado en la ciudad de Rosario. Para esta prueba se empleó el Procedimiento de Cálculo del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE, 2016) elaborado por la Secretaría de Estado de la Energía de la Provincia en base a la norma ISO13790:2008, y luego consensuado con IRAM, INTI, CNEA y SSAyE del MINEM. La normativa IRAM 11900 se modificó según este nuevo enfoque integral dando lugar a una nueva versión (IRAM 11900:2017).

Como derivación de lo anterior, el Ministerio de Energía de la Nación en acuerdo y colaboración con otras instituciones está llevando a cabo pruebas piloto en las ciudades de Bariloche, Mendoza y Tucumán con el objeto de estudiar el comportamiento de distintas tipologías de viviendas emplazadas en diferentes zonas climáticas. Asimismo, la Provincia de Santa Fe realizará pruebas similares en la ciudad de Santa Fe.

La norma ISO 13790:2008, la norma IRAM 11900:2017 y el Procedimiento de Cálculo del Índice de Prestaciones Energéticas si bien proponen un cálculo estacionario incluyen una corrección por los efectos dinámicos a través del factor de utilización de los aportes gratuitos en invierno y del factor de utilización de las dispersiones térmicas en verano. Dichos factores, además de depender de las características de la vivienda son fuertemente dependientes del clima y para su determinación se necesitan estudios dinámicos. Dichos estudios, necesarios para cada zona bioclimática, pueden realizarse con distintas herramientas de simulación dinámica tales como EnergyPlus, etc. (Corrado y Fabrizio, 2006).

En este trabajo se continua y amplía el análisis hecho para un muro (Stagnitta et al., 2017) utilizando un método *dinámico de resolución analítica* a partir de extender la metodología propuesta por la norma ISO 13786:2007. Se estudia una vivienda cuya envolvente incluye elementos opacos y transparentes e intercambio de energía por infiltraciones.

El método propuesto se constituiría como una herramienta alternativa para la determinación de los “factores de corrección dinámicos” a fin de ser propuestos para su incorporación al Procedimiento de Cálculo del Índice de Prestaciones Energéticas y a la norma IRAM 11900:2017.

Los datos de las viviendas requeridos por el método propuesto en este trabajo son los mismos que se necesitan para aplicar la norma ISO 13790:2008, el Procedimiento de Cálculo del Índice de Prestaciones Energéticas y la norma IRAM 11900:2017. Esto permitiría contrastar resultados y si el universo de viviendas lo permite estimarse los “factores de corrección dinámica” para cada tipología y para cada zona climática.

Se presenta el estudio del comportamiento de un prototipo de vivienda con el modelo propuesto para un mes de julio considerado “típico” de la ciudad de Rosario y se comparan los resultados con una simulación mediante elementos finitos con el software COMSOL Multiphysics, como validación de la metodología propuesta.

METODOLOGIA

Se plantea un modelo sencillo de transferencia de calor a través de la envolvente de una vivienda con el exterior. Los muros y aberturas se consideran “elementos de la envolvente”. En el problema planteado se asumen las siguientes hipótesis:

- la vivienda puede modelizarse como una única zona térmica
- el aire confinado en la zona tiene una temperatura uniforme
- se considera que los flujos de calor a través de los muros y aberturas son unidireccionales, despreciándose los efectos de borde y los “puentes térmicos”
- no se considera flujo a través del suelo
- las superficies que componen la envolvente, además del intercambio convectivo-radiativo reciben íntegramente radiación solar global, no considerándose sombras sobre las distintas superficies
- los sistemas activos de climatización instalados (calefacción o refrigeración) sólo pueden funcionar en un modo, es decir que en los períodos de análisis extraen calor del ambiente o agregan calor al

mismo. Si el mes considerado es un mes de demanda de calefacción entonces los dispositivos solamente podrán agregar calor, mientras que si se analiza un mes de refrigeración entonces solo podrán extraer calor

El estudio de la zona térmica, se realiza a partir de la formulación de una ecuación de balance global para los procesos de transferencia de calor en la masa de aire de la zona (DoE, 2014):

$$\underbrace{\rho_a c_{pa} V_{zona}}_{(a)} \frac{dT_{int}}{dt} = \underbrace{\sum_{k=1}^{N_{cargas}} q_k}_{(b)} + \underbrace{\sum_{j=1}^{N_{sup}} h_{int} A_j (T_{j\ sup,int} - T_{int})}_{(c)} + \underbrace{q_{sis}}_{(d)} + \underbrace{q_{inf}}_{(e)} \quad (1)$$

que puede escribirse en forma compacta:

$$\rho_a c_{pa} V_{zona} \frac{dT_{int}}{dt} = q_{gan} + \sum_{j=1}^{N_{sup}} q_{j\ conv\ int} + q_{sis} + q_{inf} \quad (2)$$

donde

c_{pa}	calor específico del aire [J/kgK]
ρ_a	densidad del aire [kg/m ³]
h_{int}	coeficiente de transmisión de calor por convección para cada superficie interior [W/m ² K]
A_j	área de cada elemento de envolvente que compone la zona [m ²]
V_{zona}	volumen de aire de la zona [m ³]
T_{int}	temperatura de la zona [K]
$T_{sup,int}$	temperatura de la superficie interna de cada elemento de envolvente que compone la zona [K]
q_k	flujo de calor debido a cargas internas de la zona [J/s]
q_{sis}	flujo de calor debido a los sistemas de climatización [J/s], que será positivo en caso de calefacción y negativo en caso de refrigeración

Cada término en la ecuación indica:

- (a) energía almacenada en el aire de la zona térmica
- (b) q_{gan} , flujo de calor debido a cargas o ganancias internas y ganancia solar directa a través de elementos transparentes de la envolvente
- (c) $q_{j\ conv\ int}$, flujo de calor por convección con la superficie interior de cada elemento de envolvente j que conforma la zona
- (d) q_{sis} , flujo de calor aportado o extraído por sistemas de climatización
- (e) q_{inf} , flujo de calor debido a intercambio por infiltraciones

Este balance debe acoplarse con la ecuación de transferencia de calor a través de la envolvente a los efectos de determinar la temperatura de la superficie interior de cada elemento ($T_{j\ sup,int}$).

La transferencia de calor en el componente i de un elemento de la envolvente genérico j es:

$$\rho_i c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_i \nabla T) \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

Condiciones de contorno sobre la superficie interna del elemento de envolvente ($i=1$):

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} = h_{int} (T_{sup,int} - T_{int}) \quad (4)$$

Condiciones de contorno sobre la superficie externa de cada elemento de la envolvente ($i=N$):

$$-\lambda_N \frac{\partial T}{\partial x} = F_{form} \varepsilon \sigma (T_{cielo}^4 - T_{sup,ext}^4) + h_{ext} (T_{ext} - T_{sup,ext}) + \alpha_N I_{sol,j} \quad (5)$$

donde:

c_{pi}	calor específico del componente i [J/kgK]
ρ_{ai}	densidad del componente i [kg/m ³]
λ_i	conductividad térmica del componente i [W/mK]
F_{form}	factor de vista de la superficie externa
ε	emisividad de la superficie
σ	constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
T_{cielo}	temperatura del cielo [K]
T_{ext}	temperatura del ambiente exterior variable [K]
$T_{sup,ext}$	temperatura de la superficie exterior del elemento de envolvente [K]
h_{ext}, h_{int}	coeficientes de transferencia de calor por convección [W/m ² K]
α_N	absortividad de la superficie
$I_{sol,j}$	radiación solar incidente sobre la superficie exterior del elemento j de envolvente [W/m ²]

Por lo tanto en la situación ideal en la que el aporte de los sistemas de climatización (q_{sis}) puede regularse **de manera que la temperatura de la zona permanezca constante**, debe cumplirse que:

$$\rho_a c_{pa} V_{zona} \frac{dT_{int}}{dt} = q_{gan} + \sum_{j=1}^{N_{sup}} q_{j \text{ conv int}} + q_{sis} + q_{inf} = 0 \quad (6)$$

$$q_{gan} + \sum_{j=1}^{N_{sup}} q_{j \text{ conv int}} + q_{sis} + q_{inf} = 0 \quad (7)$$

Entonces, el término q_{sis} representa el flujo de calor que el equipamiento activo debe agregar o extraer a la zona para mantener constante la temperatura del aire.

Para el caso de **calefacción**, se define $q_{sis}^*(t)$ como la parte positiva de $q_{sis}(t)$ reflejando el hecho de que los sistemas activos solamente pueden aportar un flujo de energía positivo al sistema (agregan calor) mientras que cuando haya que extraerlo los sistemas no podrán actuar a tales fines:

$$q_{sis}^*(t) = \begin{cases} q_{sis}(t) & q_{sis}(t) \geq 0 \\ 0 & q_{sis}(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Esta consideración tiene el objetivo de simular el hecho práctico real de que en días cálidos de invierno no se encienden los sistemas de refrigeración (aires acondicionados) sino que la práctica normal es por ejemplo la ventilación mediante apertura de ventanas.

Finalmente, la energía útil total efectivamente erogada por los sistemas activos estará dada por la siguiente ecuación:

$$Q_{sis} = \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} q_{sis}^*(t) dt \quad (9)$$

Esta energía útil, luego de ser afectada por el rendimiento o el COP del equipo de climatización, implicará una demanda de cierta energía o vector energético que tiene su correspondiente consumo de energía primaria asociado. Por lo tanto conociendo el valor de Q_{sis} y considerando la eficiencia de toda la cadena de conversión energética estamos conociendo el verdadero recurso energético necesario para mantener en condiciones de confort una zona térmica, pudiéndose estimar el grado de eficiencia energética de una vivienda, para luego asignar clases en un sistema de certificación o calificación de eficiencia energética en edificios.

Linealización del intercambio radiativo con el cielo

El término de la ec. (5) correspondiente al intercambio radiativo con el cielo, que es función de diferencias de temperaturas a la cuarta potencia, se linealiza acorde a la siguiente expresión:

$$F_{form} \varepsilon \sigma \left(T_{sup,ext}^4(t) - T_{cielo}^4(t) \right) \cong h_r F_{form} (T_{sup,ext}(t) - T_{cielo}(t)) \quad (10)$$

donde

$$h_r = \varepsilon \sigma \left(T_{sup,medio}^2 + T_{cielo,medio}^2 \right) (T_{sup,medio} + T_{cielo,medio}) \quad (11)$$

El coeficiente de intercambio radiativo h_r que se asumirá constante de valor $4,55 \frac{W}{m^2K}$ (ISO 13790:2008, de Wit, 2009) y la temperatura de cielo constante en $4^\circ C$ durante todo el año. Por lo cual la ec (5) resulta:

$$-\lambda_N \frac{\partial T}{\partial x} = h_r F_{form} (T_{sup,ext}(t) - T_{cielo}(t)) + h_{ext} (T_{ext} - T_{sup,ext}) + \alpha_N I_{sol} \quad (12)$$

Cálculo de q_{gan} y q_{inf}

El término q_{gan} (ec. 7) considera el flujo de calor aportado a la zona debido a cargas internas como personas, luces, equipamiento electrónico, etc. además de contemplar el aporte solar directo a través de aquellos elementos transparentes de la envolvente. En el presente trabajo no se consideran aportes internos, sino solamente las ganancias debidas a aportes solares directos a través de elementos transparentes de la envolvente:

$$q_{gan} = \sum_{k=1}^{N_{sup,transp.}} \tau_k A_k I_{solar,k} \quad (13)$$

donde:

τ_k transmitancia óptica del elemento transparente k

A_k área del elemento transparente k [m^2]

$I_{solar,k}$ radiación solar incidente sobre la superficie exterior del elemento de envolvente k [W/m^2]

Asimismo se consideran infiltraciones a través de áreas de fuga de aberturas y otros elementos. Se asume que el flujo de calor debido a infiltraciones será proporcional a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de la zona térmica a través de un coeficiente (H_{inf}) que será función del caudal de renovaciones considerado, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$q_{inf} = H_{inf} (T_{ext} - T_{int}) \quad (14)$$

Con estas simplificaciones la envolvente de la zona térmica se compondrá de N_{sup} elementos de los cuales $N_{sup,transp}$ elementos serán transparentes. Luego la ecuación (7) resulta:

$$\sum_{j=1}^{N_{sup}} q_{j conv int} + \sum_{k=1}^{N_{sup,transp.}} A_k \tau_k I_{solar,k} + H_{inf} (T_{ext} - T_{int}) + q_{sis} = 0 \quad (15)$$

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones acoplado (SE) formado por las ec.15, ec. 3, ec. 4, ec. 12 permite calcular q_{sis} . La Fig. 1 muestra un esquema que representa el SE correspondiente a una vivienda real.

A continuación se presentan los dos métodos de resolución de este problema no estacionario.

Solución analítica (SA)

El sistema de ecuaciones (SE) se puede representar mediante un circuito eléctrico equivalente haciendo uso de la analogía entre flujo de calor y corriente eléctrica y entre temperatura y potencial eléctrico. La analogía entre circuitos térmicos y eléctricos es ampliamente utilizada como herramienta de resolución de problemas de transferencia de calor (Mills, 1995; de Wit, 2009; Davies, 2004).

El circuito equivalente para un muro (Stagnitta et al., 2017), se modifica de manera de considerar el aporte solar directo sobre el interior de la zona térmica, obteniendo un circuito genérico que represente los flujos tanto en el caso de muros ($\tau = 0$) como de aberturas.

Por lo tanto el Circuito C1 (Fig. 2), representa el intercambio por unidad de área entre el interior de una zona térmica a temperatura T_i y el exterior a temperatura T_e para *cada elemento genérico de la envolvente, sea transparente u opaco*. En este circuito la fuente q_1 representa la fracción de q_{sis} destinada a compensar los flujos a través de este elemento genérico j .

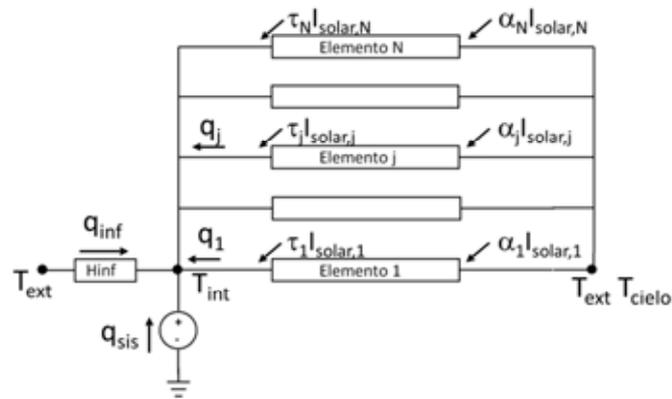


Figura 1: Esquema del sistema de ecuaciones SE para N elementos y con intercambio de energía por infiltraciones.

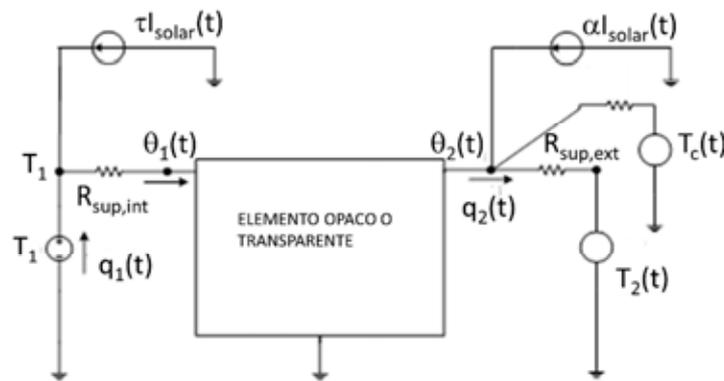


Figura 2: Circuito C1 para un elemento de envolvente genérico j por unidad de área

Si se asumen las hipótesis que permiten obtener una *solución analítica* (Stagnitta et al., 2017), entonces la solución del sistema se obtendrá a partir de la resolución de un circuito en corriente continua y cinco circuitos en corriente alterna para cada elemento de la envolvente y se aplicará el mismo procedimiento para el intercambio por infiltraciones.

Resolución del circuito para corriente continua

Para las excitaciones de corriente continua, el circuito a resolver se muestra en la Fig. 3, resultando (Grossman, 1996):

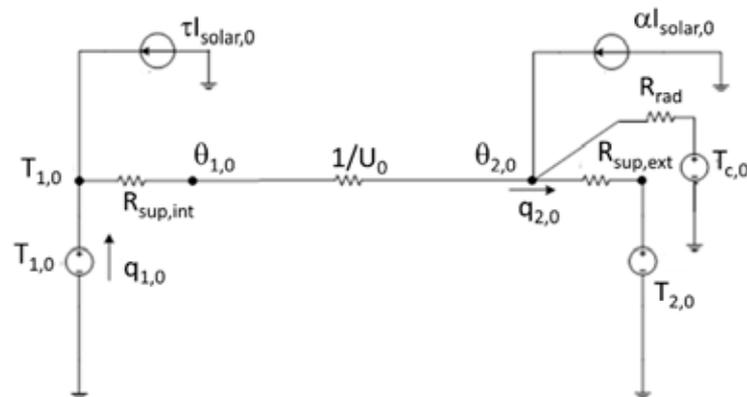


Figura 3: Circuito C2 de corriente continua

$$\mathbf{Q}_0 = (\mathbf{I} + (\mathbf{G} + \mathbf{G}_R)\mathbf{Y}_0^{-1})^{-1}(\mathbf{G}\mathbf{T}_0 + \mathbf{G}_R\mathbf{T}_C + \mathbf{A}\phi_0) - \mathbf{C}\phi_0 \quad (16)$$

siendo:

$$\mathbf{Q}_0 = \begin{bmatrix} q_{1,0} \\ -q_{2,0} \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\theta}_0 = \begin{bmatrix} \theta_{1,0} \\ \theta_{2,0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} T_{1,0} \\ T_{2,0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 0 \\ T_{C,0} \end{bmatrix}; \quad \phi_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{solar,0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_0 = U_0 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{sup,int}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{sup,ext}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{rad}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tau \end{bmatrix}$$

Resolución del circuito de corriente alterna para cada excitación armónica (n=1; 2; 3; 4; 5):

Se resuelve este sistema por el método fasorial (Zeveke y Ionkin, 1973) para cada frecuencia, por lo cual se obtendrá la solución en régimen permanente. El circuito en corriente alterna se muestra en la Fig. 4, resultando (Grossman, 1996):

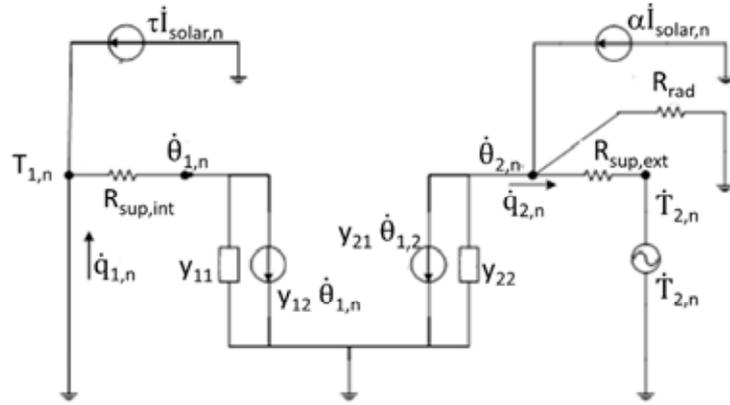


Figura 4: Circuito C3 de corriente alterna.

$$\dot{\mathbf{Q}}_n = (\mathbf{I} + (\mathbf{G} + \mathbf{G}_R)\mathbf{Y}^{-1})^{-1}(\mathbf{G}\dot{\mathbf{T}}_n + \mathbf{A}\dot{\phi}_n) - \mathbf{C}\dot{\phi}_n \quad (18)$$

siendo:

$$\dot{\mathbf{Q}}_n = \begin{bmatrix} \dot{q}_{1,n} \\ -\dot{q}_{2,n} \end{bmatrix}; \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_n = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1,n} \\ \dot{\theta}_{2,n} \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{T}}_n = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{T}_{2,n} \end{bmatrix}; \quad \dot{\phi}_n = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{solar,n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_n = \begin{bmatrix} Y_{11,n} & Y_{12,n} \\ Y_{21,n} & Y_{22,n} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{sup,int}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{sup,ext}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{rad}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tau \end{bmatrix} \quad (19)$$

Con los coeficientes de la matriz \mathbf{Y}_n calculados según (Stagnitta et al., 2017).

Construcción de la solución temporal

Rescatando el elemento $q_{1,0}$ del vector \mathbf{Q}_0 y los elementos $\dot{q}_{1,n}$ de los vectores $\dot{\mathbf{Q}}_n$, la solución temporal para cada elemento de la envolvente j de área A será (Zeveke y Ionkin, 1973; Davies, 2004):

$$q_j(t) = -Aq_1(t) = -A \left[q_{1,0} + \sum_{n=1}^5 \frac{1}{\sqrt{2}} \text{Im}\{\dot{q}_{1,n} e^{jn\omega t}\} \right] \quad (20)$$

Y para el flujo de calor debido a infiltraciones, luego de hacer el proceso análogo de resolución de un circuito en corriente continua y cinco circuitos en corriente alterna, será:

$$q_{inf}(t) = H_{inf}(T_{ext,0} - T_{int,0}) + \sum_{n=1}^5 \frac{1}{\sqrt{2}} \text{Im}\{H_{inf}(\dot{T}_{ext,n} - \dot{T}_{int,n})e^{jn\omega t}\} \quad (21)$$

Resultando entonces la solución al sistema la suma de los intercambios de cada elemento de la envolvente y el intercambio por infiltración, según se observa en el esquema gráfico de la Figura 1,

$$q_{sis}(t) = - \left[\sum_{j=1}^N q_j(t) + q_{inf}(t) \right] \quad (22)$$

Solución numérica (SN)

Se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales planteado usando el software COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics es una plataforma de cálculo diseñada para la resolución numérica de problemas por elementos finitos, con variadas aplicaciones en el campo de la Física y de la Ingeniería, especialmente cuando intervienen fenómenos acoplados o multifísicos.

Los valores horarios de temperatura ambiente y radiación solar incidente se ingresan como datos de entrada además de los coeficientes de transferencia de calor por convección en la superficie interior e exterior y todas las propiedades físicas y ópticas de los materiales que componen los muros, cubierta y aberturas de la vivienda simulada.

Cómo resultados se obtienen la evolución de la temperatura de todos los puntos de la envolvente y el flujo de calor q_{sis} .

A los efectos de testear la precisión de resolución numérica realizada, se compararon los resultados obtenidos usando diferentes mallas y pasos de tiempo. Finalmente se decidió trabajar con una malla “finer” (≈ 57 elementos lineales) y pasos de tiempo de 600 seg.

RESULTADOS

A los efectos de completar la comparación de los dos métodos detallados de resolución del sistema de ecuaciones acoplado (SE), se analizó una vivienda formada por cuatro muros con orientaciones N, S, E y O y una cubierta horizontal, con aberturas transparentes en los muros N y S. Se considera una única zona térmica cuya temperatura debe mantenerse fija en 20°C.

Se definieron diferentes características para los elementos transparentes de las aberturas (Tabla 1) y soluciones constructivas para muros y cubierta (Tabla 2 y 3), de forma tal de considerar dos opciones de vivienda: base y mejorada.

En las tablas 1, 2 y 3 se indican las propiedades físicas y térmicas de cada material usado y la transmitancia térmica (K) resultante. El esquema mejorado de la superficie transparente corresponde a valores equivalentes de un sistema DVH. En la Tabla 4 se completan las características que definen la vivienda simulada.

Se fijó un coeficiente por infiltraciones (H_{inf}) igual 30W/K obtenido aplicando $H_{inf} = \rho_{aire} c_{aire} \eta V_{zona}$ considerando $\eta = 0,3$ renovaciones/hora.

Las resistencias superficiales internas y externas debidas a la transferencia de calor por convección se fijaron en 0,13 m²K/W y 0,04 m²K/W respectivamente.

ESQUEMA BASE K = 5,69W/m ² K				ESQUEMA MEJORADO K = 3,54W/m ² K			
λ	c_p	ρ	e	λ	c_p	ρ	e
[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]
1,05	840	2800	0,006	0,16	840	2800	0,018

Tabla 1: Características de los elementos transparentes de las aberturas (ET).

ESQUEMA BASE MUROS K = 1,72W/m ² K				ESQUEMA MEJORADO MUROS K = 0,63W/m ² K			
λ	c_p	ρ	e	λ	c_p	ρ	e
[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]
0,93	840	1900	0,020	0,93	840	1900	0,020
0,33	840	800	0,120	0,35	840	863	0,080
1,16	840	1900	0,030	1,30	840	2100	0,010
				0,70	1000	2000	0,001
				0,03	1470	25	0,030
				0,81	800	1600	0,120

Tabla 2: Soluciones constructivas de los muros (de interior a exterior) (EM)

ESQUEMA BASE CUBIERTAS K = 2,86W/m ² K				ESQUEMA MEJORADO CUBIERTAS K = 0,33W/m ² K			
λ	c_p	ρ	e	λ	c_p	ρ	e
[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]
0,44	840	1000	0,015	0,29	710	900	0,015
1,63	840	2400	0,120	1,42	1	1	0,200
0,76	840	1600	0,050	0,03	710	38	0,080
0,70	1000	2000	0,004	17,70	480	8550	0,001

Tabla 3: Soluciones constructivas de la cubierta (de interior a exterior) (CU)

Orientación	Norte		Sur		Este	Oeste	Horizontal
	Muro	Abertura	Muro	Abertura	Muro	Muro	Cubierta
Área [m ²]	31	8	35	4	24	24	104
F _{forma}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1
α	0,5	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5
τ	0	0,88	0	0,88	0	0	0
Esquema constructivo	EM	ET	EM	ET	EM	EM	CU

Tabla 4: Características de los elementos de la envolvente de la vivienda simulada.

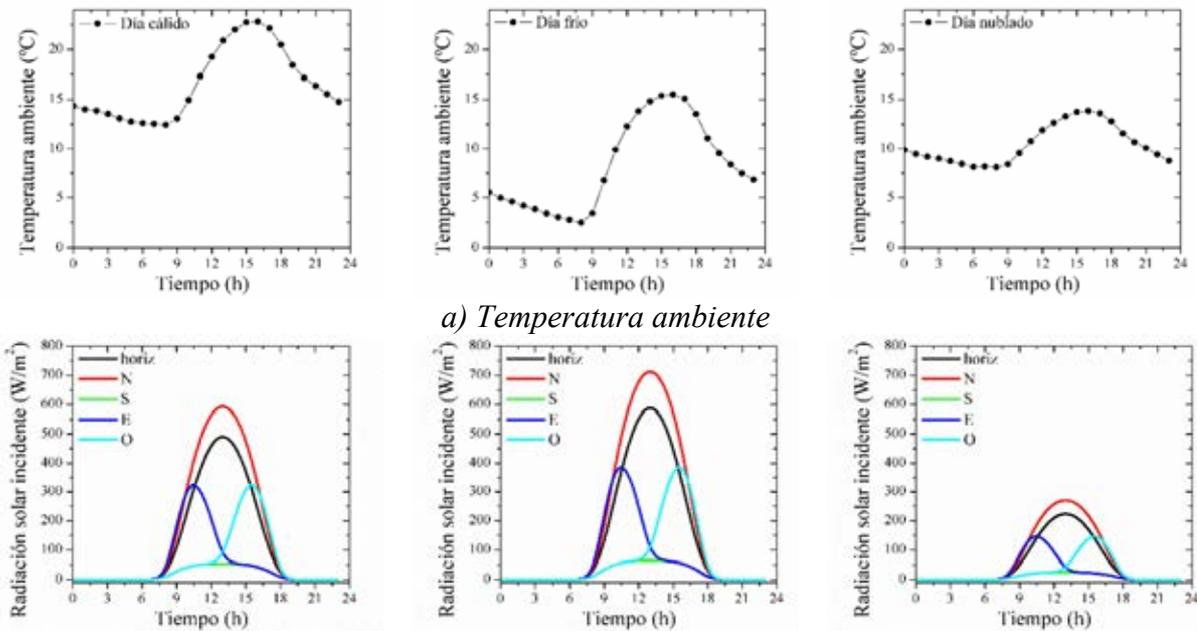
Se eligió el mes de Julio, representado por tres días típicos cuyas temperatura y radiación incidente sobre los distintos muros se muestran en Fig 5 a y b. El mes completo de Julio consta de días cálidos, fríos y nublados con una ocurrencia de 8, 14 y 9 respectivamente sobre un total de 31 días.

En la Fig. 6 se grafican el valor de q_{sis} y q_{sis}^* para cada método de resolución, para cada día de cálculo y tipo de vivienda. La energía útil que deberá entregar el sistema de calefacción para mantener la temperatura de la zona fija en 20°C para cada día (ec. 9) se muestra en la Tabla 5, así como las diferencias porcentuales entre ambas soluciones.

Para determinar la energía requerida para la climatización durante el mes de Julio completo mediante el método analítico, se suma el requerimiento de cada día típico multiplicado por la ocurrencia correspondiente. Este cálculo es válido ya que el método considera solamente el régimen permanente

por lo cual no tiene en cuenta los transitorios asociados a las posibles secuencias de días que forman el mes real.

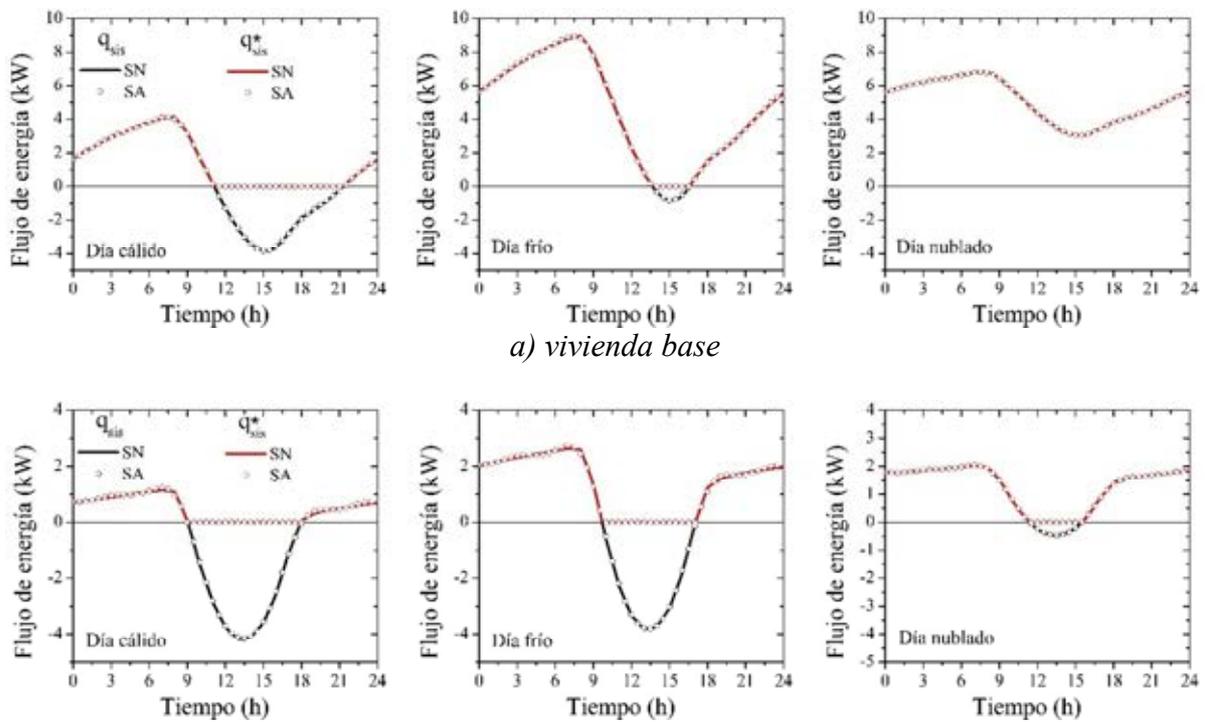
El método numérico tiene en cuenta los procesos transitorios por lo tanto se analizaron diferentes secuencias de días a los efectos de evaluar las diferencias que surgen de ello. Se espera que las máximas diferencias se evidencien en secuencias aleatorias, siendo esto un caso muy extremo ya que en general los días se presentan con cierto grado de agrupamiento.



a) Temperatura ambiente

b) Radiación solar incidente

Figura 5: Temperatura ambiente y radiación solar incidente para los días típicos del mes de Julio en Rosario



a) vivienda base

b) vivienda mejorada

Figura 6: Flujos de energía para los días de simulación considerados.

La primera secuencia analizada (SEC1) es una secuencia ordenada de 8 días cálidos seguidas de 14 días fríos y finalmente 9 días nublados. Luego, se construyeron 4 secuencias aleatorias manteniendo la ocurrencia de cada día típico a los efectos de comparar con la secuencia ordenada SEC1. La máxima diferencia encontrada fue de 0.5% lo que muestra que el orden de aparición de los distintos días típicos tiene poca incidencia en el requerimiento total de energía.

La comparación entre los resultados obtenidos con los dos métodos se muestra en la Tabla 6.

Vivienda	Día		SA	SN	Dif,
	tipo	Ocurrencia	[kWh]	[kWh]	%
Base	Cálido	8	34,6131	34,4958	0,34
	Frío	14	108,2947	108,0669	0,21
	Nublado	9	122,1303	122,3850	-0,21
Mejorada	Cálido	8	11,3076	11,0021	2,70
	Frío	14	32,6388	32,4838	0,48
	Nublado	9	30,4771	30,3561	0,40

Tabla 5: Energía total suministrada para mantener la temperatura interior constante [kWh] durante cada día típico. Diferencias porcentuales entre los métodos de resolución.

Vivienda	SA	SN	Dif
	[kWh]	[kWh]	%
Base	2874,69	2804,686	-2,50
Mejorada	812,1457	802,5284	-1,20

Tabla 6: Energía total suministrada para mantener la temperatura interior constante [kWh] durante el mes de Julio completo. Diferencias porcentuales entre los métodos de resolución.

CONCLUSIONES:

Se observa que la diferencia entre los resultados para días individuales entre los dos métodos es menor al 1% en todos los casos a excepción del caso de la vivienda mejorada para el día cálido. En este último caso, el flujo de calor es el menor de todos (producto de la baja diferencia de temperatura interior exterior y de la aislación de la vivienda). Si bien las diferencias absolutas son del mismo orden, en términos relativos adquieren mayor peso.

En el análisis del mes completo se observan diferencias mayores entre los dos métodos que son ocasionadas por la existencia de los efectos transitorios, tenidos en cuenta en la solución numérica y no considerados en la solución analítica. Estas diferencias no superan el 3%.

Las distintas secuencias de días generadas aleatoriamente arrojaron resultados similares (diferencias de 0.5%) utilizando el método de solución numérica, por lo que se puede inferir que el orden de aparición de los distintos días típicos tiene poca incidencia en el requerimiento total de energía.

Las diferencias obtenidas entre los dos métodos contrastados son pequeñas comparadas con los errores que se esperarían en los resultados originados por incertezas en los datos de entrada.

A partir de lo anterior se puede concluir que los resultados obtenidos validan el método propuesto de resolución analítica como herramienta para la estimación de los requerimientos energéticos de una vivienda y se constituye en una herramienta alternativa para la determinación de los “factores de corrección dinámicos” a fin de ser propuestos para su incorporación al Procedimiento de Cálculo del Índice de Prestaciones Energéticas y a la norma IRAM 11900:2017.

Si bien no se consideraron en el modelo las ganancias internas debidas a la ocupación ni el flujo a través del suelo, el modelo permite incorporar estos efectos. Asimismo, tanto la temperatura interna de

confort, como el intercambio por infiltraciones y las ganancias por metabolismo pueden caracterizarse con un perfil dado durante el día no debiendo ser necesariamente constantes. Se consideró en este caso la temperatura interna constante en 20°C para respetar las hipótesis de las actuales normas y procedimientos vigentes pensando en una futura comparación de resultados.

Un próximo paso es replicar el estudio para todos los meses de calefacción y lo mismo para los meses de refrigeración a los efectos de analizar las diferencias para cada mes y en el total de requerimiento de energía anual. Asimismo, los resultados de este método propuesto pueden compararse con resultados obtenidos mediante EnergyPlus.

Una vez calibrado el método para distintas zonas climáticas, y vista la fácil implementación del mismo en cualquier sistema de resolución matricial, se podrían estudiar viviendas “reales” relevadas de las distintas experiencias de pruebas piloto a los fines de ajustar parámetros de corrección dinámica de las normas y procedimientos utilizados actualmente.

REFERENCIAS

- Corrado, V. y Fabrizio, E. (2006). A simplified calculation method of the annual energy use for space heating and cooling: Assessment of the dynamic parameters for the Italian building stock and climate. *Research in Building Physics and Building Engineering*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-41675-2
- Davies, M. G. (2004), *Building Heat Transfer*. Hoboken, NJ John Wiley & Sons, Ltd. UK.
- de Wit M. H. (2009). *Heat and moisture in building envelopes*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- DoE (2014). U.S. Department of Energy. *EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations*.
- Grossman, S. (1996). *Algebra Lineal*. McGraw Hill
- IRAM 11900 (2017) *Prestaciones energéticas en Viviendas*.
- Mills, A. F. (1995). *Transferencia de Calor*. Editorial Irwin.
- Norma ISO 13786:2007. *Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods*
- Norma ISO 13790:2008. *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*
- IPE (2016). *Procedimiento de Cálculo del Índice de Prestaciones Energéticas. Versión 0*. Secretaria de Estado de la Energía, Provincia de Santa Fe.
- Stagnitta, R.; Gastón, A. y Abalone, R. (2017) *Modelo analítico para estimar el consumo energético para climatización de viviendas en régimen dinámico. Parte 1: Análisis del flujo de energía a través de muros*. AVERMA Vol. 21, pp 08.167-08.178. ISSN 2314-1433
- Zeveke G. V. y Ionkin P. A. (1973). *Principios de Electrotecnia*. Grupo Editorial Buenos Aires

ABSTRACT:

The need for developing a national procedure for energy labelling of buildings gives an opportunity to validate models used to calculate the energy requirements for climatization. An equivalent electric model is proposed which has an analytical solution when input variables such as ambient temperature and solar radiation (or any other temporal load) are represented by a senoidal. In present work, the heating requirement a dwelling for the whole month of July in Rosario city is determined. Such month is characterized by three typical days (warm, cold, cloudy) with certain occurrence. To validate the proposed method, the estimated energy requirement was compared with that obtained with COMSOL Multiphysics by finite element analysis. The differences between methods were less than of 3%. This results validate the proposed analytical solution methodology as an alternative tool for energy requirements of a dwelling as well as “the dynamic correction factors” introduced by the Energy Performance Index Calculation Procedure (IPE) and IRAM 11900:2017 norm.

Keyword: analytical model, energy requirements, dwelling

IMPACTO DE SISTEMAS DE ENVERDECIMIENTO VERTICAL EN EL COMPORTAMIENTO TERMO-ENERGÉTICO DE ESPACIOS URBANO EDILICIOS. ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE

P. Suárez,¹ M. Alicia Cantón,² Érica N. Correa²

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CCT CONICET Mendoza)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Av. Ruiz Leal s/n. Parque Gral. San Martín. C.P. 5500 – Mendoza
Tel. 0261-5244310 – Fax 0261-5244001 e-mail: psuarez@mendoza-conicet.gov.ar

Recibido 12/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: El trabajo evalúa el potencial de los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) como reguladores de las condiciones termo-energéticas de los espacios a escala urbano-edilicia. Se analizan sistemáticamente distintos aspectos del conocimiento científico producido durante la última década: distribución geográfica y climática, categoría de SEV, métodos y resultados. La temática ha crecido a nivel mundial y muestra eficiencia en la disminución de las temperaturas de los espacios habitables exteriores e interiores y los consumos de energía, cuya magnitud depende del clima. Las Paredes Vivas son el sistema más eficiente, generando disminuciones máximas de 6.5 °C en la temperatura interior, 3.3 °C en la temperatura exterior, 26 °C en la temperatura superficial y 59 % en el consumo de energía. Esto avala la generación de conocimiento local asociado a los beneficios termo-energéticos de los SEV en climas desérticos y su adecuación a las características morfológicas y tecnológicas del parque edilicio de Mendoza.

Palabras clave: Sistemas de Enverdecimiento Vertical; eficiencia termo-energética; zonas áridas.

INTRODUCCION

En las ciudades, la antropización del medio eleva las temperaturas urbanas y los consumos de energía en edificios, representando el 35% de la energía consumida a nivel mundial. Crear “comunidades frescas” es un imperativo internacional y refrendado en la República Argentina por el Plan de Acción para el Cambio Climático. En los países desarrollados diversas estrategias de mitigación han sido propuestas y están siendo estudiadas a fin de determinar su efectividad y eficiencia en relación a los costos asociados a su implementación (Doulos et al., 2004; Synnefa et al., 2005 y 2007; Zinzi et al., 2012). Entre ellas, el enverdecimiento urbano como alternativa para incrementar la cobertura vegetal de los espacios. Los efectos de las diferentes formas de infraestructura verde en el enfriamiento de la ciudad y su impacto sobre los consumos de energía de los edificios y la mejora del confort térmico han alcanzado un grado de desarrollo y madurez suficiente. Dichas investigaciones han permitido determinar que en un clima templado el aumento de la proporción de la infraestructura verde en un 10% podría reducir las temperaturas medias del aire urbano 2.5° C (Gill et al, 2007), reducir la frecuencia y magnitud de la isla de calor urbana y ahorrar hasta un 20% del uso de energía convencional, debido a la menor demanda de aire acondicionado (Akbari et al, 2004).

Sin embargo, el fenómeno de consolidación de las ciudades ha limitado el potencial de incorporación de estructuras verdes tradicionales – parques, plazas, arbolado de alineación- surgiendo nuevas formas de vegetación asociadas a su incorporación a las envolventes edilicias: Techos y paredes verdes. A nivel internacional existe un bagaje de conocimiento importante respecto al desarrollo tecnológico y la cuantificación de los beneficios de las cubiertas verdes (K. Vijayaraghavan, 2016); siendo más incipientes los avances respecto a paredes vegetadas.

¹ Becario Doctoral CONICET

² Investigadora Independiente CONICET

El Área Metropolitana de la ciudad de Mendoza, Argentina, (AMM) se inserta en una zona signada por la aridez y la restricción de los recursos hídricos. Desde el punto de vista de su concepción urbanística, cuenta en su estructura con una importante cantidad de espacios abiertos forestados, que ha dado lugar a un modelo urbano calificado como ciudad “oasis” (Bórmida, 1984).

Sin embargo, se trata de una ciudad consolidada, con baja disponibilidad de vacíos urbanos. Por otra parte, desde el punto de vista energético- ambiental la ciudad presenta severos problemas asociados al aumento de la temperatura urbana, con una magnitud de isla de calor que alcanza los 10 °C (Correa, 2006). Dicho fenómeno tiene un impacto directo en las condiciones de habitabilidad de los espacios urbano-edilicios y en los consumos de energía para alcanzar condiciones de confort.

Las consideraciones descriptas, en términos de pérdida de espacios verdes y de la debilidad de las condiciones ambientales de la ciudad plantean la necesidad de incorporar masa vegetal a la ciudad a través de la implantación de nuevas tecnologías como estrategia para la consecución de la sustentabilidad urbano-edilicia.

Este trabajo busca analizar y compactar el conocimiento científico internacional, para determinar el estado del arte respecto al impacto de los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) en la regulación de las condiciones térmicas de los espacios a escala urbana y edilicia y, sus impactos energéticos. Persigue determinar el potencial de la estrategia en esta área temática y sus posibilidades de implementación en medios urbanos de zonas áridas.

Categorías de Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV)

Los SEV se agrupan en tres categorías: Fachada Verde, Pared -muro- Viva y Sistemas Mixtos que poseen características de las categorías anteriores (Fig. 1).

Fachadas Verdes son todos aquellos sistemas en los que hay plantas trepadoras y/o arbustos colgantes cubriendo un área determinada. Las plantas están sembradas en terreno natural (o base de la estructura) o en macetas ubicadas a distintos niveles de la fachada. Pueden dividirse en tres tipologías: *fachadas verdes tradicionales*, donde la estructura de la planta es el mismo muro del edificio; *fachadas verdes tipo doble piel o cortina verde*, donde existe una estructura suplementaria que se separa una distancia variable de la pared del edificio; y *fachadas verdes con macetas perimetrales*, donde pueden alojarse macetas a distintos niveles con plantas trepadoras y/o arbustos colgantes para generar una cortina verde.

Las fachadas verdes tradicionales se consideran aquellas hechas por plantas trepadoras que se desarrollan directamente en la pared del edificio sin ningún sistema de sujeción. Esta práctica de paisajismo se ha asociado típicamente con daños a los materiales de la fachada, atracción de animales y altos costos de mantenimiento. Sin embargo, recientemente, se están desarrollando diferentes sistemas de construcción. Estos nuevos sistemas permiten reverdecer las fachadas de los edificios, que han evolucionado técnica y conceptualmente con respecto a las tradicionales.

Las fachadas verdes tipo doble piel, las presentan distintas alternativas como: *enrejados modulares, estructuras de malla y cableados*. Los *enrejados modulares* son módulos de rejillas adosados a la pared del edificio o en estructuras independientes, que funcionan de sostén de las plantas trepadoras. Las *estructuras de cableados* son un sistema de cables de acero, anclajes, separadores, etc., que constituyen una estructura liviana que sirve de soporte para las plantas trepadoras.

Las *estructuras de malla* son estructuras ligeras que proporcionan soporte para las trepadoras, hecha con malla metálica anclada a la estructura del edificio. Estos últimos sistemas son adecuados para realizar refacciones y remodelaciones, ya que no implican un peso adicional a la estructura de las edificaciones.

Las *Paredes Vivas* implican un sustrato o masa fértil propicio para el crecimiento de las plantas. Se clasifican en dos tipologías de acuerdo a la técnica constructiva: *paneles modulares* y *fieltros geotextiles*, que se sujetan a un soporte (vertical u horizontal) o en la estructura de la pared.

Los *paneles modulares* y *fieltros geotextiles* brindan soporte a la vegetación -helechos, pequeños arbustos caducos o perennes, entre otros-. Los paneles pueden presentar orificios a través de los cuales crece la vegetación. Los *fieltros geotextiles* permiten albergar además musgos. Ambos pueden incorporar una cámara de aire hermética o separación de la pared (aprox. 2cm - 5cm) para brindar mejor aislación o para incorporar ese aire fresco al interior del edificio.

Las Fachadas Verdes en su conjunto son sistemas extensivos, ya que su construcción es más barata, sencilla y con bajo impacto en la construcción existente. Pueden separarse o independizarse de la estructura del edificio. Las Paredes Vivas son sistemas intensivos, debido a que comprometen de manera más invasiva la estructura del edificio, son más pesados y con mayores costos de instalación y mantenimiento.

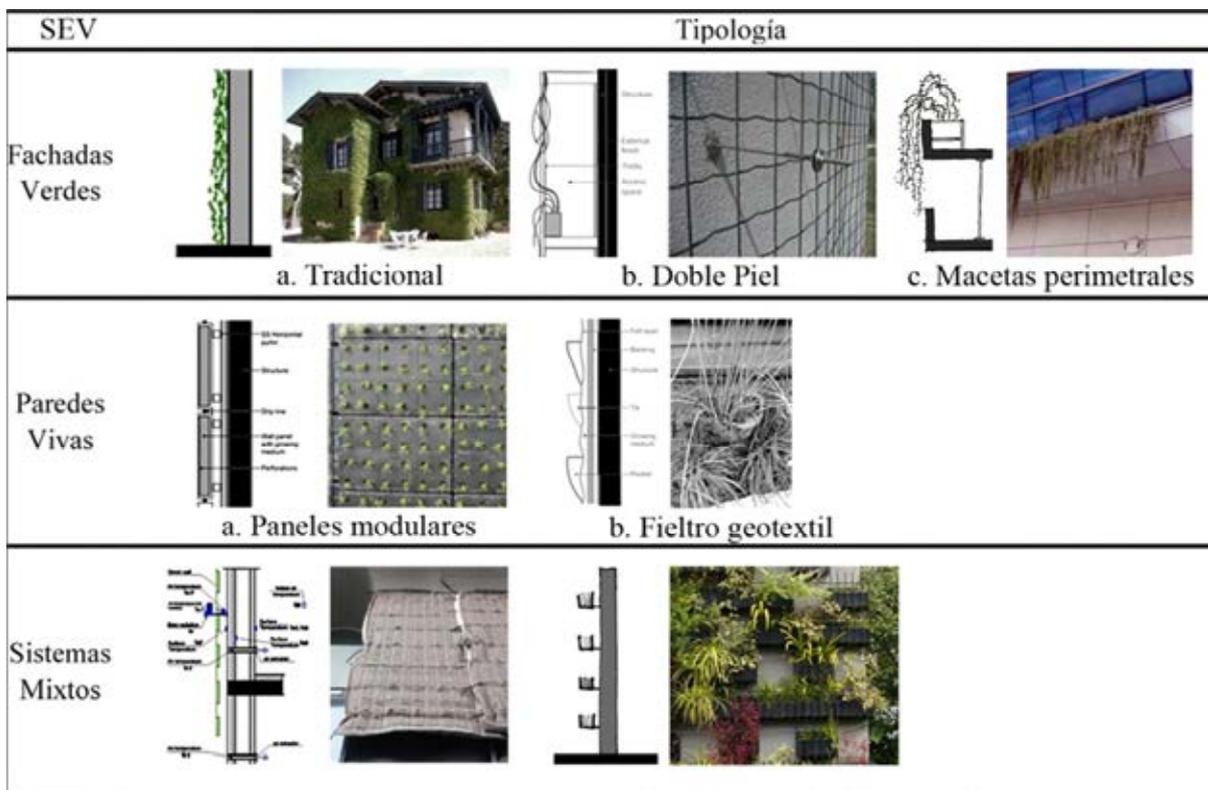


Figura 1: Tipologías de SEV.

Efectos producidos por los SEV

Los beneficios termo-energéticos de los SEV están asociados a los siguientes efectos: sombra, enfriamiento, aislación y barrera contra el viento.

El *efecto de sombra* es el que ubica a los SEV como interceptores de la radiación solar incidente, directa o indirecta. Es probablemente el efecto con mayor impacto en la reducción de las temperaturas superficiales y, como consecuencia, en la transmisión de calor a los espacios interiores.

El *efecto de enfriamiento* se debe al proceso de evaporación de agua del sustrato y las plantas. Esto incide en las variaciones de temperatura de aire interior, y temperatura y humedad del entorno inmediato. Está comprobado que el efecto de los SEV sobre la temperatura y humedad exterior se extiende hasta 60 cm de su superficie en condición aislada. En el caso de Fachadas Verdes, sólo se produce enfriamiento como consecuencia de la transpiración de las plantas. En cambio, en las Paredes

Vivas se produce además enfriamiento como consecuencia de la evaporación del agua del sustrato. En este sentido, las Paredes Vivas muestran mejor potencial de enfriamiento que las Fachadas Verdes.

El *efecto de Aislamiento* se produce como consecuencia de la interferencia de la transmisión de calor por los estratos que componen los sistemas constructivos de los SEV. Éstos pueden ser: sustratos, cámaras de aire (abiertas o herméticas), follaje, elementos estructurales y/o materiales intermedios -impermeabilizantes, etc.-. Uno de los recursos más utilizados a la hora de mejorar el efecto aislante, es la utilización de cámaras de aire intermedias. Éstas, como se dijo anteriormente, pueden ser abiertas o herméticas según sea el tipo de efecto que se busque. Si son abiertas, convierten al SEV en una fachada ventilada, y si son cerradas utilizan la capacidad aislante del aire para impedir la transferencia de calor.

El *efecto Barrera contra el Viento* se debe a que el follaje, de características rugosas y porosas, obstaculiza la circulación de aire, razón por la cual la pérdida de calor o frío por convección se ve disminuida.

METODOLOGÍA

La metodología se ha estructurado en dos etapas: rastreo bibliográfico y sistematización de contenidos.

Rastreo y recopilación bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se orientó a identificar documentos actualizados que abordan investigaciones de carácter científico referido a SEV, en diferentes localizaciones geográficas y climáticas, en el periodo 2008 - 2018. A tal fin se rastreó información en las siguientes bases de datos digitales: ScienceDirect, ProQuest, EBSCOhost, informaworld, SpringerLink, Web of Science y Wiley Interscience. Los artículos recopilados fueron seleccionados en función de la calidad de los mismos determinada a partir del análisis sistémico de indicadores (Saracevik, 1999). De esta forma, quedo definido un conjunto de 14 trabajos que abordan el comportamiento de SEV desde el punto de su influencia en las condiciones termo-energéticas de los espacios interiores conexos y su impacto sobre el microclima del entorno.

Sistematización de contenidos

Los contenidos fueron agrupados de acuerdo a los siguientes indicadores: Distribución geográfica y climática, distribución temporal de la producción, tipologías de SEV analizadas. Además, se discriminaron las metodologías empleadas para la evaluación del comportamiento termo-energético de espacios urbano-edilicios bajo la influencia de SEV y se analizaron los resultados obtenidos en forma comparativa entre las distintos SEV. Las metodologías se clasificaron en experimentales y teóricas. En ambos casos se determinó contexto –urbano/edificio-, condición –controlada/caso real-, variables de medición, períodos medidos y equipamiento utilizado. Respecto a los métodos teóricos se analizó tipo de modelo y software.

Los resultados obtenidos fueron analizados en función de cuatro variables: diferencias de temperatura superficial entre el caso testigo y caso con SEV, diferencias de temperatura interior, diferencias de temperatura exterior y reducción del consumo energético para acondicionamiento de espacios interiores.

RESULTADOS

Distribución geográfica de los documentos analizados

Respecto a la distribución geográfica de los documentos analizados, se observa que el 64% de ellos corresponden a países europeos, el 21% a países asiáticos y el 14% restante a países sudamericanos (Fig. 2).

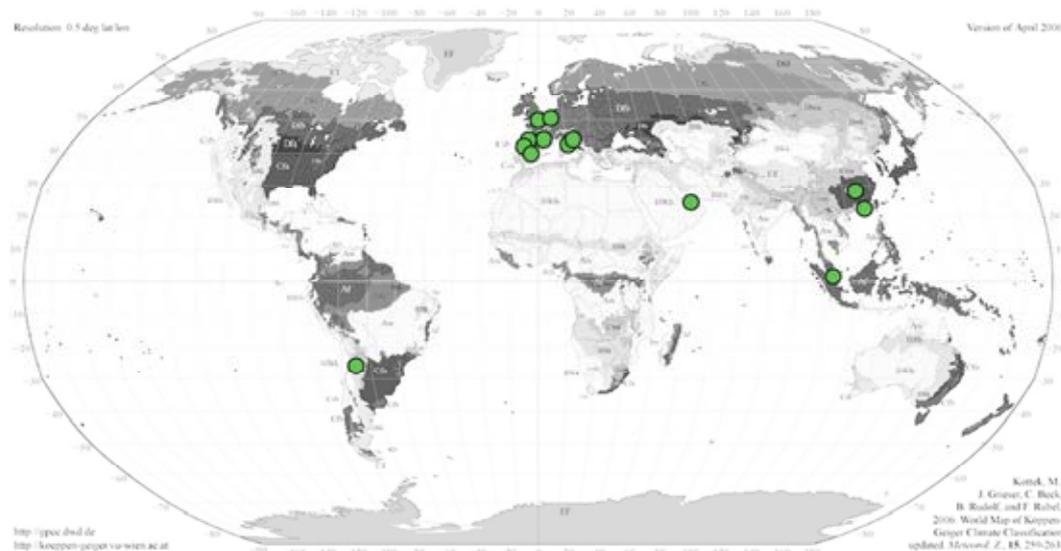


Figura 2: Distribución geográfica de documentos analizados

Distribución climática de documentos según la clasificación de Köppen, Geiger

El desarrollo de conocimiento se registra mayoritariamente en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) - 44%- y del tipo Csa (templado cálido, verano seco y caliente) -28%- ; y en menor medida para climas del tipo CWb (templado cálido desértico, verano caliente) -14%-, Af (Ecuatorial húmedo) -7%- y BWh (árido desértico) -7%- (Fig. 3).

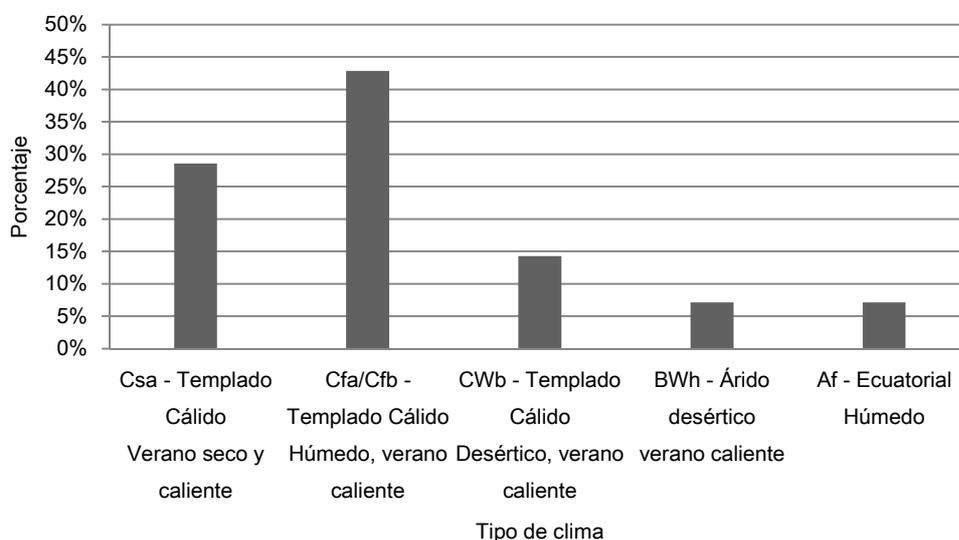


Figura 3: Distribución climática de documentos analizados

Distribución temporal de la temática

En el período 2008 – 2018 se observa una tendencia de crecimiento positiva. Durante la última década, la producción se ha incrementado 2.5 veces, es decir, creció del 10% en el año 2010 al 25% en el año 2017 (Fig. 4).

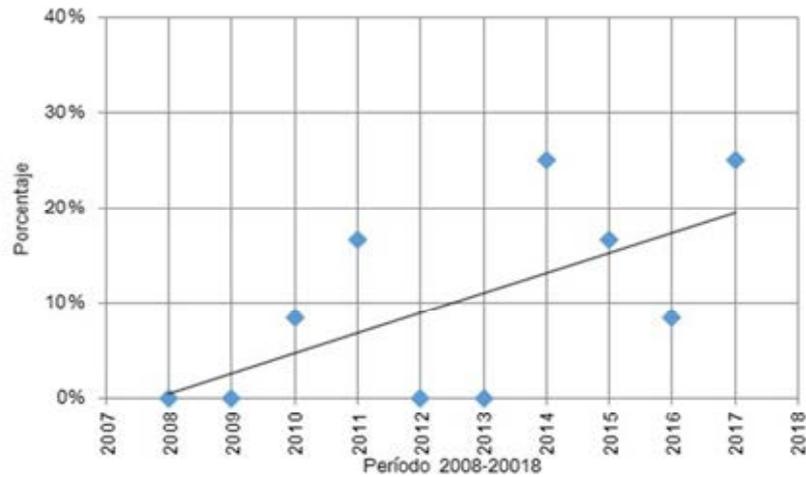


Figura 4: Distribución temporal de documentos analizados

Distribución porcentual de SEV

Dentro del conjunto de estudios analizados, las Paredes Vivas son el SEV en el cual se han centrado las investigaciones durante la última década. Del universo de documentos revisados, el 50% corresponde a Paredes Vivas, el 41% a Fachadas Verdes y el 9% a Sistemas Mixtos. Dentro del sistema denominado Paredes Vivas, las tipologías de paneles modulares presentan la mayor cantidad de casos estudiados. Y en el sistema denominado Fachadas Verdes, la más estudiada corresponde a la tipología de doble piel (Fig. 5).

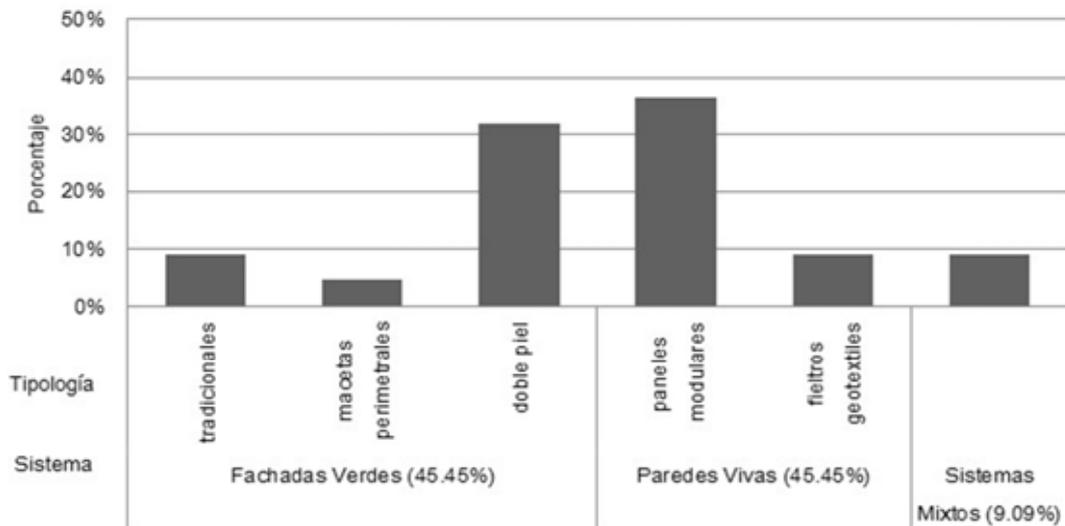


Figura 5: Distribución porcentual de SEV

Metodologías empleadas para la evaluación del comportamiento termo-energético de espacios urbano-edilicios bajo la influencia de SEV

Los trabajos evaluados han adoptado como metodología de análisis en un 58% métodos del tipo experimental y el resto de los trabajos se abordan mediante métodos teóricos.

En lo que concierne a los métodos experimentales el 62.5% corresponde a la evaluación de casos reales mediante monitoreo en campo y el resto en condiciones controladas a través del monitoreo de prototipos de muros y/o espacios a escala con SEV respecto a un caso testigo. Entre las variables medidas se encuentran: parámetros meteorológicos (radiación solar, velocidad y dirección de viento, humedad relativa, iluminancia, etc.), temperatura superficial, temperatura del aire exterior e interior, y consumo de energía.

La estación del año monitoreada con mayor frecuencia es el verano (seis de ocho casos evaluados), si bien algunos autores evalúan las dos estaciones extremas (dos de ocho casos), y otros, estaciones intermedias (tres de ocho casos). El período de medición es variable, comprendiendo lapsos de tiempo continuos máximos de treinta días, y mínimos de un día. La frecuencia de toma de datos también es variable, registrando a los mismos cada quince segundos hasta una única medición por semana a una hora determinada.

En relación al equipamiento de medición, en el 50% de los casos la temperatura superficial se registra mediante sensores de termistor del tipo HOBO-H8 Pro, Pt100, Tecno.EL, etc., y en el resto de los casos se distribuye equitativamente entre sensores de termocupla tipo T, por ejemplo HOBO-U12T, y termómetros IR del tipo TESTO 845. La temperatura de aire exterior e interior ha sido medida mayoritariamente mediante sensores de termistor y termocupla, y sólo en un caso mediante sonda de hilo caliente. En cuanto a las variables meteorológicas la radiación solar ha sido medida mediante solarímetros del tipo SK08, SP-110; la velocidad de viento con sonda de hilo caliente tipo TESTO; y la iluminancia exterior con luxómetro TESTO 545. Además se indica que se ha medido la humedad relativa sin precisar el tipo de equipamiento utilizado (Tabla 1).

Artículo		Tipología SEV	Variables medidas	Equipamiento	Referencia Temporal
Autor	Lugar				
H. Wong 2010	Singapur. Af (Ecuatorial Húmedo)	Paredes Verdes, Fachadas Verdes y sistemas mixtos.	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termocupla HOBO U12 / Termistor H8 Pro	Estación: Verano Período: Días claros. T° Superficial 3 días claros de Febrero, Abril y Junio Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada una hora.
			Variables meteorológicas: NO		
G. Vox 2018	Bari, Italia. Csa (Templado cálido húmedo)	Fachada verde tipo Doble Piel	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termistor HOBO / Termistor Hygroclip S3	Estación: Invierno, Verano. 2 años. Período: 6 días por estación Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 15 minutos.
			Variables meteorológicas: Radiación solar.		
K. Perini 2017	Génova, Italia. Csa (Templado cálido húmedo)	Sistema Mixto. Fachada verde tipo Doble Piel con sustrato.	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior	Termistor / Solarímetro RTD Pt100 (Clase A)	Estación: Primavera, Verano, Otoño Período: franja horaria 8 A.M. - 6 P.M. Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 15 minutos.
			Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa		
J. Coma 2017	Lleida, España. Csa (Templado cálido húmedo)	Pared Viva y Fachada Verde	T° Superficiales / Consumo eléctrico	Termistor Pt-100 DIN B / Analizador de redes eléctricas MK30LCD-Clase 1	Estación: Verano, Invierno Período: Junio-Julio, Diciembre- Febrero Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 5 minutos.
			Variables meteorológicas: Radiación solar		
G. Pérez 2011	Lleida, España. Csa (Templado cálido húmedo)	Fachada verde tipo Doble Piel	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termómetro IR TESTO 845 / Termohigrómetro TESTO 625	Estación: Primavera Período: Abril-Septiembre. 7 días. Frecuencia: 1 vez por semana, 14:00Hs, promedio semanal.
			Variables meteorológicas: Iluminancia solar, humedad relativa y velocidad de viento		
M. Haggag 2014	Al-Ain, Emiratos Árabes. BWh (Clima árido desértico)	Pared Viva tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior	Termómetro IR T-type PTFE aislados / Sonda de hilo caliente	Estación: Verano Período: Julio Frecuencia: cada intervalos de 10 minutos.
			Variables meteorológicas: velocidad de viento		
K. Perini 2011	Holanda meridional, Holanda. Cfb (Templado cálido húmedo)	Fachada Verde tradicional, Fachada Verde doble piel, y Pared Viva con macetas modulares.	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termómetro IR / Sonda de hilo caliente Testo	Estación: Otoño Período: Septiembre - Octubre Frecuencia: cada 15 segundos, 10 promedios de datos por día.
			Variables meteorológicas: radiación solar		
M. Therese Hoelscher 2016	Berlín, Alemania. Cfb (Templado cálido húmedo)	Fachada Verde tradicional	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termistor SKTS 200	Estación: Verano Período (3): 1 - 6 Agosto 2013; 19 Julio - 16 Agosto 2013; Agosto 2013 Frecuencia: cada 15 segundos, 10 promedios de datos por día.
			Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa		

Tabla 1: Metodologías experimentales para la evaluación de SEV

En cuanto a los métodos teóricos el 84% corresponde a la evaluación de casos experimentales en condiciones controladas de prototipos de muros, y/o espacios a escala, con SEV respecto a un caso testigo. El resto simula casos reales con y sin SEV ubicados en una zona urbana consolidada, y valida resultados con los obtenidos en condiciones controladas reportados en la literatura internacional. Las variables estudiadas a partir de la simulación de los distintos escenarios fueron: temperatura superficial, evapotranspiración del paquete biológico que conforma el SEV, temperatura del aire exterior e interior, consumo de energía. Y, en menor medida, parámetros meteorológicos como atenuación de la radiación solar y variación de la velocidad y dirección de viento, etc.

La estación del año simulada con mayor frecuencia es el verano (cinco de seis casos), si bien algunos autores evalúan las dos estaciones extremas, y otras estaciones intermedias (dos de seis en ambos casos). El período de simulación es variable, comprendiendo lapsos de tiempo máximos de catorce días, y mínimos de siete días. Sin embargo K.W.D. Kalani (2017) simula períodos de tres meses equivalentes a las mediciones. En relación al software de simulación, en el 50% de los casos se utiliza EnergyPlus, y en el resto se emplea TRNSYS y SOLENE, dependiendo de la escala abordada en la evaluación del impacto del SEV.

Artículo		Tipología SEV	Variables medidas	Software simulador	Referencia Temporal
Autor	Lugar				
R. Djedjig 2015	La Rochelle, Francia; Atenas, Grecia. Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente)	Paredes Verdes tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior / Consumo de energía Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa	TRNSYS Type VegEnvelope	Estación: Verano, Otoño, invierno y Primavera Período: Mayo 2012 - Abril 2013 Frecuencia: muestras cada 5 minutos
L. Malys 2014	Geneva, Suiza. Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente)	Sistema Mixto, Fachada verde tipo Doble Piel con sustrato.	T° Superficiales / T° Aire exterior Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección de viento	SOLENE Microclimate	Estación: Primavera Período: 14 - 24 de Mayo. 7 días. Frecuencia: hora a hora, promediado cada 24 horas..
S. Flores 2014	Salta, Argentina. Cwa (templado cálido invierno seco, verano caliente)	Fachada Verde tipo doble piel	T° Superficiales / T° Aire exterior Variables meteorológicas: Radiación solar, heliofania, humedad relativa, velocidad de viento	EnergyPlus V7.1	Estación: Verano Período: Diciembre Frecuencia: Hora a hora
S. Flores 2015	Cwa (templado cálido invierno seco, verano caliente)	Fachada Verde tipo doble piel	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa, velocidad de viento	EnergyPlus V7.1	Estación: Verano, Invierno Período: Junio-Julio, Diciembre- Febrero Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 5 minutos.
R. Djedjig 2016	La Rochelle, Francia / Atenas, Grecia. Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente)	Paredes Verdes tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa	TRNSYS - Herramienta: Building Energy Simulation (BES)	Estación: Verano Período: Agosto 2012 Frecuencia: muestras cada 1/2 segundo, promediado cada 5 minutos.
K. W. D. Kalani 2017	Wuhan / Hong Kong, China, Cfa (templado cálido húmedo, verano caliente)	Pared Viva tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior / Consumo de energía Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa, velocidad de viento	EnergyPlus (característica EMS)	Estación: Verano Período (2): 25 de Junio (07:00 - 19:00); y Junio-Septiembre Frecuencia: muestreo no especificado, promedios por hora.

Tabla 2: Metodologías teóricas para la evaluación de SEV

Análisis de resultados

El conocimiento generado ha sido discriminado para su análisis en función de las prestaciones de los distintos SEV respecto al siguiente conjunto de variables: Diferencia de temperatura superficial entre muro control y muro con SEV; Diferencia de temperatura ambiente interior; Diferencia de temperatura ambiente exterior; Ahorro energético para el acondicionamiento de espacios interiores (Tabla 3).

	Paredes Vivas								Fachadas verdes								Sistemas Mixtos							
	ΔT° Sup ($^{\circ}$ C)		ΔT° Int ($^{\circ}$ C)		ΔT° Amb Ext		$\$/W-h$ (%)		ΔT° Sup ($^{\circ}$ C)		ΔT° Int ($^{\circ}$ C)		ΔT° Amb Ext		$\$/W-h$ (%)		ΔT° Sup ($^{\circ}$ C)		ΔT° Int ($^{\circ}$ C)		ΔT° Amb Ext		$\$/W-h$ (%)	
	Max	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Max	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Max	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Csa - Templado Cálido Verano seco y caliente	21		6					58.9		17.6	5.5					33.8								
Cfa/Cfb - Templado Cálido Húmedo, verano caliente	26.2	20.8	4	1.1	1.5			37	11.9	15.5	5	0.2	0.03					20					26	
CWb - Templado Cálido Desértico, verano caliente	16									8.83														
BWh - Árido desértico verano caliente	13	5	6.5					20.5																
Af - Ecuatorial Húmedo	12	6.4			3.3			31	10	4.5				0.2				9						

Tabla 3: Resultados

Diferencia de temperatura superficial entre caso testigo y caso con SEV

Dentro de las 3 tipologías analizadas, las fachadas verdes muestran un rango de disminución de la temperatura superficial que oscila entre 4.5 $^{\circ}$ C y 17.5 $^{\circ}$ C. Alcanzan las máximas diferencias en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente) y las mínimas en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo). En el sistema de paredes vivas se observa un rango de disminución de la temperatura superficial que varía entre 5 $^{\circ}$ C y 26 $^{\circ}$ C, alcanzando la máxima diferencia en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) y la mínima diferencia en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente). Respecto a los Sistemas Mixtos se verifica un rango de disminución de temperatura superficial que varía entre 9 $^{\circ}$ C y 20 $^{\circ}$ C, donde las máximas diferencias se registran en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) y las mínimas diferencias en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo).

Diferencia de temperatura interior entre caso testigo y caso con SEV

En los trabajos analizados, las diferencias de temperatura interior han sido evaluadas para los sistemas de Fachadas Verdes y Paredes Vivas. El impacto de las Fachadas Verdes en la temperatura interior ha sido sólo analizado en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) y no muestra una diferencia representativa respecto al caso testigo (< 0.2 $^{\circ}$ C). En cuanto a los sistemas de Paredes Vivas, se observan diferencias de temperatura en un rango comprendido entre 1.1 $^{\circ}$ C y 6.5 $^{\circ}$ C, alcanzando la mínima diferencia en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) y la máxima diferencia en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente). La contrastación del efecto de ambos sistemas sobre las temperaturas interiores en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) muestran que en el caso de Paredes Vivas alcanzan diferencias máximas de 4 $^{\circ}$ C y en el caso de las Fachadas Verdes no se verifica ningún impacto.

Diferencia de temperatura exterior entre caso testigo y caso con SEV

Al igual que en el caso del análisis de las diferencias de temperatura interior entre el caso testigo y los casos con SEV, el análisis de la variable de temperatura exterior se ha efectuado sólo con sistemas de Fachadas Verdes y Paredes Vivas. Las Fachadas Verdes muestran una disminución máxima de la temperatura exterior entre caso testigo y caso con SEV de 3 $^{\circ}$ C para climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) y equilibrio térmico para climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo).

En Paredes Vivas, se observan diferencias de temperatura en un rango comprendido entre 1.5 °C y 3.3 °C, alcanzando la mínima diferencia en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) y la máxima diferencia en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo).

Reducción de consumo energético en espacios interiores entre caso testigo y caso con SEV

La reducción de consumo energético para enfriamiento ha sido evaluada en las tres tipologías de SEV. El análisis de la variable en relación a espacios interiores que presentan en su envolvente Fachadas Verdes, muestra una reducción en el consumo de energía del orden del 33.8% para climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente). En el sistema de Paredes Vivas se observa un rango de reducción de consumo de energía que oscila entre 10% y 58.9%, alcanzando la mínima reducción en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo), y la máxima en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente). El impacto de los Sistemas Mixtos en el consumo de energía ha sido abordado solamente en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) alcanzando reducciones del orden del 26%.

CONCLUSIONES

El análisis bibliográfico realizado muestra que mayoritariamente los estudios se han realizado en países europeos en climas del tipo templado cálido, tanto húmedo como seco -Csa, Cfa/Cfb-, siendo los sistemas más estudiados las Paredes Vivas con tipología de paneles modulares. Y que el desarrollo del conocimiento registra un crecimiento positivo durante la última década. Sin embargo, son escasos los estudios referidos al impacto de los SEV en climas desérticos. Esto avala la importancia de su abordaje en ciudades intermedias de zonas áridas.

En el abordaje metodológico se utilizan tanto métodos experimentales –mayoritariamente en condiciones controladas-, como métodos teóricos, basados en la simulación de prototipos de muros y/o espacios a escala. Se observa que la mayoría de los estudios se realizan durante el verano, dado que el impacto de los SEV parecería ser de mayor relevancia sobre las cargas de refrigeración que sobre las de calefacción debido al incremento de la transferencia de calor como consecuencia de la evapotranspiración del paquete biológico y el efecto de sombreado sobre la envolvente edilicia.

Los resultados recopilados permiten concluir en que las Paredes Vivas muestran ser el sistema más eficiente, y la magnitud del impacto depende del tipo de clima. Alcanzan las mayores diferencias de temperatura superficial -26.2 °C- en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente), de temperatura interior -6.5 °C- en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente), de temperatura exterior -3.3 °C- en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo) y los mayores ahorros energéticos -58.9 %- en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente).

Si bien las Fachadas Verdes constituyen una alternativa de aplicación a envolventes edilicias de menor complejidad tecnológica, son menos eficientes, alcanzando diferencias máximas de temperatura superficial del orden de 17.5 °C y reducciones en el consumo de energía del 33% en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente). Y no se registran impactos positivos en las temperaturas interiores en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente).

En lo concerniente a los Sistemas Mixtos, muestran eficiencias intermedias con diferencias de temperatura superficial del orden de los 20 °C (Paredes Vivas 26 °C; Fachadas Verdes 15.5 °C) y reducciones de consumo de energía del 26% (Paredes Vivas 37%) en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente).

De lo discutido previamente se desprende que la temática ha crecido en función de su relevancia a nivel mundial en la última década. Asimismo, muestra probada eficiencia en la disminución de las temperaturas de los espacios habitables exteriores e interiores y sus consecuentes impactos en los consumos de energía. Esto avala la importancia de generar conocimiento a nivel local con el objeto de profundizar el estudio de los SEV en climas del tipo desértico, rasgo dominante de la ciudad de

Mendoza, y evaluar su potencial de adecuación a las características morfológicas y tecnológicas de los edificios y sus beneficios termo-energéticos a escala urbana y edilicia.

REFERENCIAS

- Akbari, H. et al (1997). Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy Build* 25, 117–126.
- Bórmida, E. (1984). Mendoza: modelo de ciudad-oasis. *Revista de la Universidad de Mendoza*. 68–71.
- Santamouris M. (2014). Cooling the cities. A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103, 682–703.
- Coma, J. y et al (2014). New Green Facades as Passive Systems for Energy Savings on Buildings. *Energy Procedia* 57, 1851-1859.
- Coma, J. y et al (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment* 111, 228-237.
- Correa, E. N. (2006). Isla de Calor Urbana. El caso del área metropolitana de Mendoza. Tesis doctoral en Ciencias, Área Energías Renovables. Fac. de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Salta-Argentina.
- Djedjig, R. y et al (2015). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings* 86, 93-103.
- Djedjig, R. y et al (2016). Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate* 16, 75-85.
- Doulos L. y et al (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces: The role of materials. *Solar Energy* 77 (2): 231-249.
- Flores Larsen S. y et al (2014). Thermal Simulation of a Double Skin Façade with Plants. *Energy Procedia* 57, 1763-1772.
- Flores Larsen S. y et al (2015). Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy* 121, 56-67.
- Haggag M. y et al (2014). Experimental study on reduced heat gain through green façades in a high heat load climate. *Energy and Buildings* 82, 668-674.
- Hoelscher M. T. y et al (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings* 114, 283-290.
- Kalani K.W.D. (2017). Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings* 138, 47-59.
- Malys M y et al (2014). A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and Environment* 73, 187-197.
- Pérez G. y et al (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy* 88, 4854-4859.
- Perini, K. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment* 46, 2287- 2294.
- Perini K. y et al (2017). The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 143, 35-42.
- Saracevic T. (1999). Information Science. *Journal of the American Society for Information Science*, vol. 50, nº 12, p. 1060
- Vox G. y et al (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment* 129, 154-166.
- Wong N. y et al (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* 45, 663-672.

ABSTRACT

This paper evaluates the potential of Vertical Greenery Systems (VGS) as regulators of thermal-energetic conditions of the urban and building spaces. Different aspects of the knowledge of last decade are analyzed systematically: geographic and climatic distribution, VGS categories, methods and results. The thematic has grown at a worldwide level and shows efficiency in decreasing internal

and external temperatures of habitable spaces and energy consumption, whose magnitude depends of the climate. Living Walls are the most efficient system, generating maximum decreases of 6.5 °C in the interior temperature, 3.3 °C in the exterior temperature, 26 °C in the surface temperature and 59% of the energy consumption. This endorse the generation of local knowledge associate to the thermal-energetic benefits of VGS in deserted climates and his adequacy to the morphologic and technologic characteristics of buildings in Mendoza.

Keywords: Vertical Greenery Systems; thermal-energetic efficiency; arid climates.

CALIDAD AMBIENTAL DE LAS AULAS DE COLEGIOS EN EL TRÓPICO: EVALUACIÓN SUBJETIVA Y OBJETIVA DEL CONFORT TÉRMICO, VISUAL Y SONORO

Montoya Olga ⁽¹⁾, San Juan Gustavo ⁽²⁾

⁽¹⁾ Programa de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño (FAAD). Universidad de San Buenaventura, Cali. Avenida 10 de mayo, La Umbría, vía a Pance. C.P. 76001. Colombia.
Tel: 057-2-4882222 ext. 8059. E-mail: olmontoy@usbcali.edu.co

⁽²⁾ Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC-CONICET/UNLP). Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP) Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires
Tel. 0221-4236587/90 int. 250.e-mail: gustavosanjuan60@hotmail.com

Recibido 12/08/18, aceptado 28/09/18

RESUMEN: El trabajo presenta la evaluación de la calidad ambiental (térmica, visual y acústica) en relación con la normativa, de las aulas de cuatro establecimientos escolares. La metodología empleada fue de auditoría ambiental, organizada en dos componentes: (i) objetivo, (mediciones); y (ii) subjetivo, (encuesta de percepción). Asimismo, los resultados se verificaron con la normativa local e internacional. Los resultados en cuanto al confort térmico, evidencian aulas en su mayoría en estado no confortable. En el tema visual, se registraron niveles de iluminación natural insuficientes y falta de uniformidad. Por último, los niveles de ruido de fondo y tiempo de reverberación, excedieron los límites normativos para el confort acústico, los cuales se entienden como los valores necesarios para garantizar espacios con calidad, para las actividades de aprendizaje al interior de las aulas.

Palabras clave: Calidad ambiental, aulas escolares, confort térmico, confort visual, confort acústico, clima tropical.

INTRODUCCION

La comprensión del confort en colegios, es fundamental para arquitectos e ingenieros al momento de proveer espacios ambientalmente adecuados y en equilibrio entre las condiciones externas e internas, con lo cual los procesos de enseñanza y aprendizaje (Murillo & Martínez-Garrido, 2012) se puedan realizar en condiciones confortables y satisfactorias. (San Juan, Hoses, Martini, 2014).

La zona de confort (zona en donde la mayoría de los ocupantes manifiestan un grado de satisfacción con el medio que los rodea) es definida por instituciones nacionales e internacionales, que estiman los valores admisibles en las normas. Estos, han sido ampliamente aplicados y/o cuestionados en condiciones estacionales, sin embargo, son recientes las investigaciones en contextos tropicales y cálidos.

En los temas del confort térmico, los resultados muestran que la sensación térmica en confort reportada por los estudiantes es más elevada que la indicada por las normas (Liang, Lin, & Hwang, 2012; Tablada, De La Peña, & De Troyer, 2005). En cuanto al confort visual, Arango Díaz, L., et al, (2013), alertan sobre el riesgo de analizar los vanos de fachada de manera aislada con los aspectos térmicos, en especial en aulas sin vidrio, relacionadas de manera directa con el exterior, en las cuales, sin la correcta zonificación de espacios y la selección de materiales, se disminuye el confort acústico. (Zannin & Zwirtes, 2009).

¹ Investigador FAAD-USB.

² Investigador Independiente CONICET-UNLP.

El confort térmico ha sido abordado desde dos enfoques conceptuales y normativos: el modelo analítico y el adaptativo (ASHRAE, 2010). El primero se basa en una escala de sensación térmica y permite a través del voto medio, predecir el porcentaje de personas que estarán satisfechas en un espacio o *Predicted Mean Vote* (PMV), y el porcentaje de personas insatisfechas o *Percentage of People Dissatisfied* (PPD). Investigaciones (Wong & Khoo, 2003; Zhang G., et al, 2007) muestran que el modelo no refleja la situación de confort en las aulas en situación cálida, con diferencias del PMV y los votos de 2.7°C hasta 3°C respectivamente.

El segundo modelo, el adaptativo (ASHRAE, 2010), aparece como crítica a la aplicación de la norma en edificios ventilados naturalmente. Los rangos de confort bajo este modelo, se establecen a partir de la temperatura promedio exterior mensual, caso contrario al confort en edificios climatizados artificialmente (Hwang, Lin, & Kuo, 2006; Kwok & Chun, 2003).

En el tema del confort visual, es tan importante el diseño de la envolvente (ingreso de la luz), como las características del espacio (distribución) (Ledesma et al., 2004). El aprovechamiento óptimo de la iluminación natural, permite alcanzar los niveles de iluminación exigidos por las normas, y minimizar o prescindir del uso de la iluminación artificial diurna, con ahorros entre el 50% y 80% en el consumo total (Monteoliva & Pattini, 2013). Por otro lado, el ingreso desmedido de la luz genera brillos indeseados, altos contrastes, aumento del calor e ineficiencia energética (Wu, W., & Ng, E., 2003).

Según la norma colombiana NTC 4595, el límite de iluminancia sobre plano de trabajo es de 300 lux (año 2000), y 500 lux para el 2015, al igual que en Argentina y Holanda, superando el umbral de países en condiciones similares como México (400 lux) y Brasil (200 lux) (Pattini, A., 2000).

El interés de las auditorías energéticas es identificar los niveles registrados de los parámetros ambientales, y compararlos con los valores recomendados por la normativa nacional e internacional, con el fin de arribar a conclusiones y recomendaciones que guíen el diseño de edificios escolares existentes (Retrofit) o de edificios nuevos (San Juan, Hoses, Martini, 2014).

En este sentido, se entiende que los límites normativos en el espacio educativo deben favorecer las condiciones para que la actividad de enseñanza-aprendizaje, se desarrolle sin perturbaciones, ni molestias (NTC 4595, 2015), sin daños fisiológicos, sin alterar y ni agravar las condiciones normales de confort que se requieren.

El diseño del edificio y su entorno se convierten en un hecho fundamental, en donde los principios de equilibrio bioclimático, así como de eficiencia energética deben hacer parte del análisis en las primeras etapas proyectuales. En este sentido, es importante generar estudios específicos, que aporten conclusiones y recomendaciones para poder definir estrategias y desarrollar políticas de intervención en el sector.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Casos de estudio

La ciudad de Cali, Colombia, se localiza en el trópico ecuatorial cálido (3° 27' Lat. Norte; 76° 31' Long. Oeste). Se seleccionaron cuatro edificios de nivel escolar primario, con organización tipológica lineal, las cuales corresponden a una orientación solar de las fachadas principales norte-sur, no plena, situación característica de la producción arquitectónica local. Estos establecimientos son: Isaías Duarte Cancino (aula, A1 y A2), Nelson Garcés Vernaza (aulas, A3 y A4), Nuevo Latir (aulas, A5 y A6) y Juana de Caicedo (aulas, A7 y A8), (Figura 1).

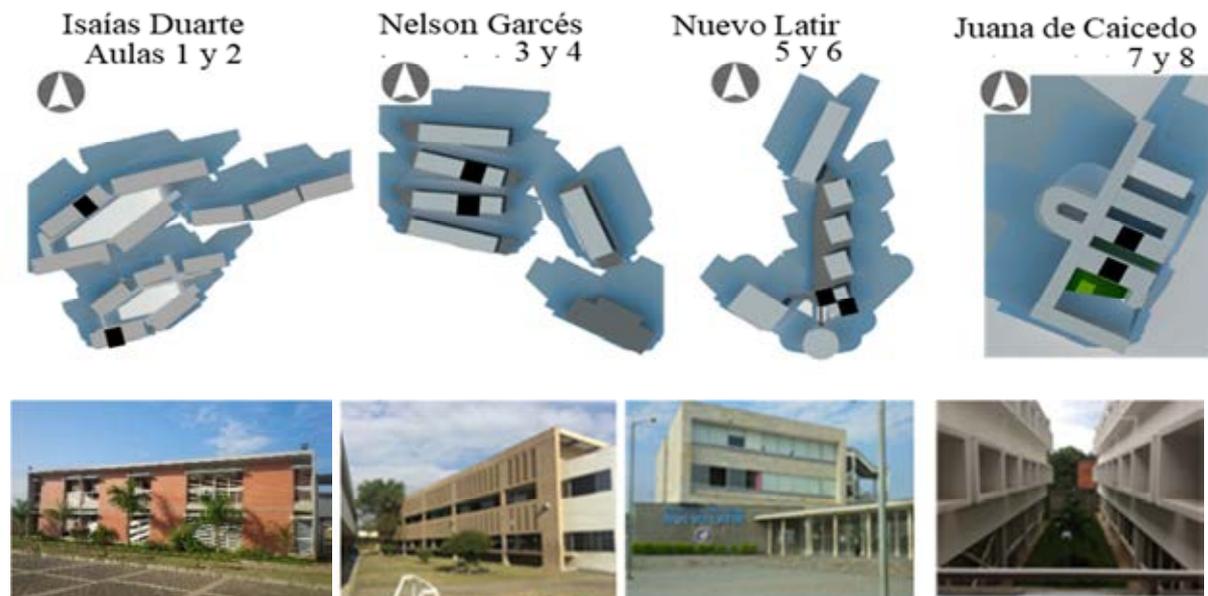


Figura 1: Esquema organizativo de los colegios, con su orientación solar, localización de las aulas estudiadas (en color negro) y las imágenes de fachadas de las aulas.

Los cuatro establecimientos están resueltos con aulas rectangulares apareadas (dos lados compartidos con aulas, uno con circulación y uno expuesto). Mientras los tres primeros están resueltos a través de tiras, el cuarto conforma patios. La materialidad constructiva y la resolución de la fachada al exterior, está resuelta de la siguiente manera: (i) Isaias Duarte: ladrillo cerámico hueco de 12cm de espesor, a la vista de ambos lados ($K= 2.8 \text{ W/m}^2\text{°C}$); (ii) Nelson: bloque de concreto de 12cm de espesor, a la vista de ambos lados ($K= 8.3 \text{ W/m}^2\text{°C}$); (iii); Nuevo Latir: bloque de concreto de 15 cm, a la vista interior y enchapado en mármol en el exterior ($K= 6.53 \text{ W/m}^2\text{°C}$); (iv) Caicedo: bloque de concreto de 20cm de espesor, a la vista de ambos lados ($K= 5.0 \text{ W/m}^2\text{°C}$).

El aula, espacio estudiado, corresponde al módulo edilicio habitable con mayor oferta y demanda de requerimientos: espaciales, energéticos, tecnológicos y de calidad ambiental; tiene mayor representatividad en un edificio escolar y posee el mayor grado de ocupación (San Juan, 2008). Por ser el espacio donde se desarrolla con mayor énfasis la relación enseñanza-aprendizaje, requiere de mayor precisión en los requerimientos de confort (iluminación, temperatura, humedad, sonido y calidad del aire).

Metodología, variables, instrumentos de análisis y tamaño de la muestra

Las condiciones ambientales se evaluaron en 4 establecimientos escolares, 8 aulas y se involucraron 535 estudiantes, entre los 8 y 16 años de edad, de los cuales 277 correspondieron en el periodo lluvioso y 258 en el periodo seco. Se aplicó la técnica del audit-diagnóstico (San Juan, Hoses, & Martini, 2014), basada en la medición de los parámetros ambientales y el sondeo de los factores de confort del usuario (percepción). En el primer caso, se recurrió a mediciones instantáneas y continuas, utilizando instrumental específico, obteniéndose datos objetivos. En el segundo caso, se trata de factores subjetivos registrados a través de una encuesta de percepción del usuario.

El diagnóstico se basa en el análisis de las variables ambientales necesarias para caracterizar el medio ambiente del aula. El procesamiento de la información implica: (i) presentar en forma descriptiva los resultados; (ii) analizar en forma relacional las variables analizadas a partir de los dos tipos de auditoría; (iii) comparar los resultados en función de los parámetros normativos considerados:

- Rangos de confort local (RCL). Zona de confort con temperaturas operativas entre 22.5°C y 26.0°C , al 60% de HR. (NTC 5316, 2015); 2°C a 24°C a 60% de HR y 1.0 clo. (ANSI/ASHRAE Standard 55/2010).

- Rango de iluminancia interior para aulas escolares. Nivel promedio mínimo 300 lux y 500 lux (NTC 4595, 2006 y 2015) respectivamente, y mínimo 300 lux, medio 500 lux y máximo 750 lux, RETILAP.
- Rango de sonido: de 40 dB a 45 dB (NTC 4595, 2015).

Las mediciones continuas se realizaron con adquiredores de datos con registro cada 10 minutos durante dos meses del año (60 días), en los meses de: marzo (lluvioso) y agosto (seco), en donde se registró, temperatura (°C) y humedad relativa (%). Se utilizaron, termo-higrómetros marca HOBO U23 Pro V2, precisión $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ entre 0° to 50°C , entre 10% a 90% RH (típico) y resolución de 0.02°C a 25°C , y 0.05 %, para el ambiente exterior; y HOBO U12-012, precisión $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ entre 0° to 50°C , entre 10% a 90% RH típico; y resolución de 0.03°C a 25°C , y 0.05 %, para el interior. En cada uno de estos períodos se realizaron además mediciones puntuales en el aula de: velocidad del aire (m/s) con anemómetro marca Lutron LM-8000, rango de 0.4 a 30.0 m/s con resolución 0.1 m/s. Temperatura superficial de muros y techos, con termómetro infrarrojo NUB 8380, rango entre -50 a 380°C . Para la iluminancia (lux) se midieron los valores en cada puesto de trabajo (Figura 10), con el luxómetro Lutron LX-1102, con rango de 40.00/400.0/4,000/40,000/400,000 Lux y resolución: 0.01 Lux a 100 Lux. Para la verificación del nivel sonoro, se registró el tiempo de reverberación con/sin ocupantes y ruido de fondo con el aula vacía con sonómetro clase 1 y analizador de espectro por bandas de tercio de octava y octava. Dichos parámetros se registraron en simultáneo a la encuesta de opinión.

Los datos incluidos en la encuesta de opinión son: (i) Personales; (ii) Estado del tiempo; (iii) Prendas de vestir; (iv) Temperatura y humedad relativa; (v) Ventilación y calidad del aire; (vi) Sonido; (vii) Iluminación natural; (viii) Iluminación artificial; (ix) Satisfacción (San Juan, et al, 1999). Para el confort térmico se definieron los valores de las prendas de vestir (clo) y para *met*, se basaron en la norma (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010), al igual que la escala de sensación térmica: muy caluroso (+3), caluroso (+2), ligeramente caluroso (+1), neutro (0), ligeramente fresco (-1), fresco (-2) y frío (-3).

Para determinar la zona en el que el 90% de los ocupantes estarán en temperatura interior de confort, se incrementa y resta 2.5°C a la temperatura promedio mensual.(Nicol, Humphreys, & Roaf, 2012). Para definir la aceptabilidad, se asumen las sensaciones térmicas cercanas al estado neutro, entre +1 y -1, como estado de confort, a partir de la literatura especializada en el tema (Hwang, R. L., et al., 2006; Wong, N. H., & Khoo, S. S., 2003; Zhang, G., Zheng, et al., 2007). Asimismo, el porcentaje de personas insatisfechas (PPD), se determina por las personas cuyo voto se encuentra en las escalas -3, -2 y +2, +3 (ASHRAE, 2017, p. 39).

Para el análisis de la iluminación se considera la iluminancia (lux) sobre el puesto de trabajo, y el coeficiente de luz diurna (CLD) como un valor relativo entre la iluminancia interior y la exterior que determina la calidad lumínica de la envolvente edilicia. Otros estudios involucran modelos dinámicos del comportamiento anual, a través de herramientas de análisis predictivo como DIVA, la cual integra iluminancia y consumo energético (Monteoliva & Pattini, 2013).

RESULTADOS

Confort Térmico

Las condiciones climáticas de Cali, propias de una situación tropical, son estables a lo largo del año, con variaciones diarias, y periodos lluviosos (marzo a mayo y octubre-noviembre) y Seco (junio a septiembre y diciembre a febrero) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia- IDEAM). La temperatura media Anual es de 24.0°C ; máxima. media de 30.3°C y mínima media de 19.0°C . Los datos recabados en las mediciones arrojan un pequeño aumento en relación a los datos estadísticos de los últimos 10 años, de $+0.7^{\circ}\text{C}$ en marzo (lluvioso) y de $+2.0^{\circ}\text{C}$ para agosto (seco). En cuanto a la humedad relativa, mientras el IDEAM registra un promedio de 72.2% en marzo (lluvioso), la HR fue de 69.8%, y en el mes de agosto (seco) de 52.2%, con un máximo de 95.2% y un mínimo de 28.5%, respectivamente. Si bien los datos anteriores permiten explicar la homogeneidad anual de la temperatura y la humedad relativa en Cali, son las variaciones diarias las que imprimen diversidad e implican el uso de diferentes estrategias arquitectónicas (Tabla 1 y Figura 2).

(%)	ESTRATEGIA ASHRAE HANDBOOK, 2005	
1	43.2%	Enfriamiento por Ventilación forzada
2	35.7%	Deshumidificación
3	33.0%	Ventilación por estrategias adaptativas
4	31.3%	Sombreado en ventanas
5	14.7%	Inercia térmica y ventilación selectiva
6	11.7%	Ganancia de calor interno
7	8.0%	Inercia térmica
8	5.9%	Enfriamiento y deshumidificación ocasional
9	5.9%	Enfriamiento evaporativo en dos etapas
10	4.9%	Ganancia solar directa e inercia térmica

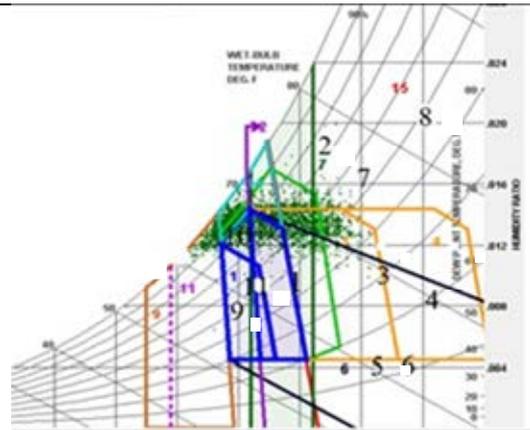


Tabla 1: Estrategias de diseño para lograr 100% de confort durante el día. ASHRAE.

Figura 2: Carta psicrométrica y estrategias. Fuente: Clima Consultant

Análisis a partir del rango de confort

Las mediciones arrojaron una temperatura promedio de 24.6°C y 26.1°C en el mes lluvioso y seco respectivamente. Los rangos en los que el 90% de los ocupantes pueden estar en confort son para el mes lluvioso 22.1°C y 27.1°C y para el seco 23.6°C a 28.6°C. A partir del registro durante el mes de marzo (el cual es análogo en agosto), en la Figura 3 se muestran las temperaturas que permanecen dentro del rango resaltado (en las horas de la noche y madrugada), dejando por fuera las horas de la mañana y tarde, horas de uso de los espacios. Las temperaturas interiores más altas, se presentan en las aulas A1 y A2 y A5 y A6, por efecto de la radiación solar directa sobre la envolvente; mientras que las temperaturas al interior del aula A4 son las que menos incrementos registran, debido al efecto de la doble piel y el uso de la vegetación como protección (Figura 4).

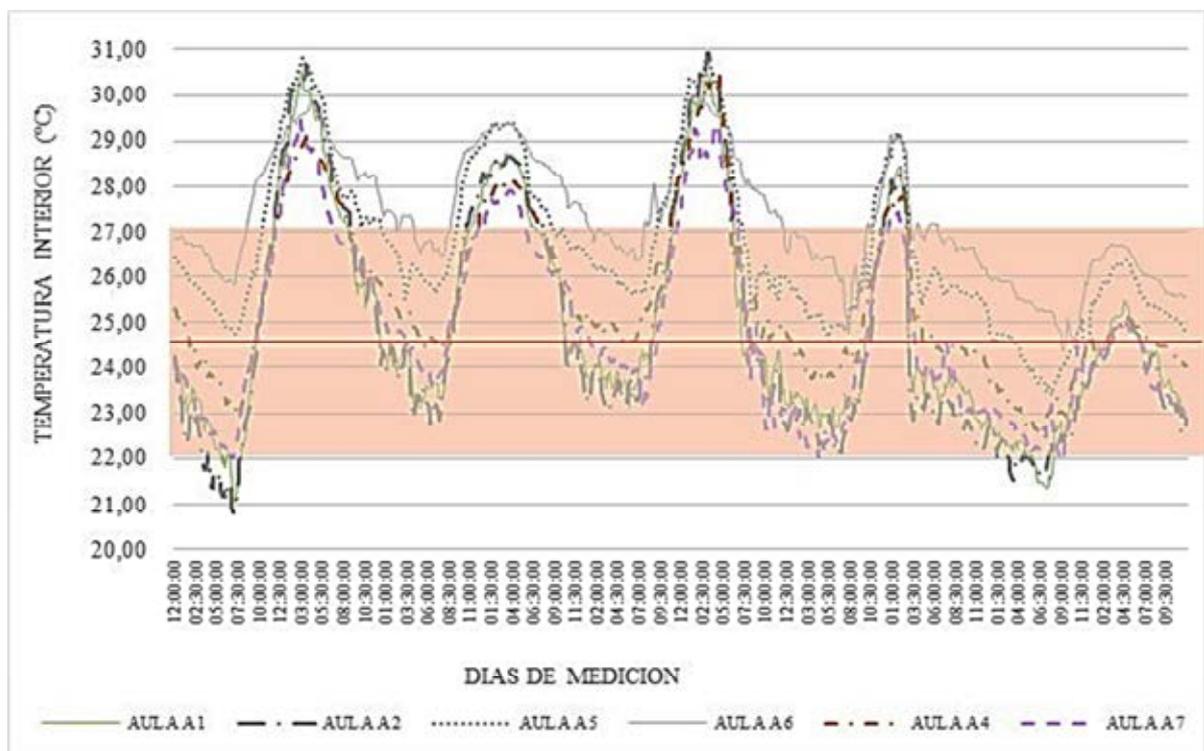


Figura 3: Temperatura interior de las aulas en los días típicos mes de marzo, con el rango de confort y la temperatura promedio mensual.

En el aula A4, las variaciones en la temperatura interior son moderadas, como resultado de estar en la planta baja, de la doble piel o envolvente que protege al espacio de la radiación solar directa, y del árbol que provee sombra, generándose una cámara de aire ventilada con la posibilidad de ventilación cruzada permanente durante el día y la noche en función de los calados en las dos fachadas opuestas (Figura 4).



Figura 4. Aula 4 (piso 1)

En las horas de la madrugada se registra una disminución de las temperaturas en las aulas A1 y A2, hasta de 2°C, y A7 de 1°C, con respecto a los demás colegios, debido a la influencia de las brisas frescas que bajan de la cordillera por la ladera para el caso del aula A7; y del límite urbano poco denso para el caso del aula A2, favoreciendo la ventilación cruzada permanente, ya que ambos colegios no poseen vidrios en las ventanas, (Figura 5) (Figura 6).

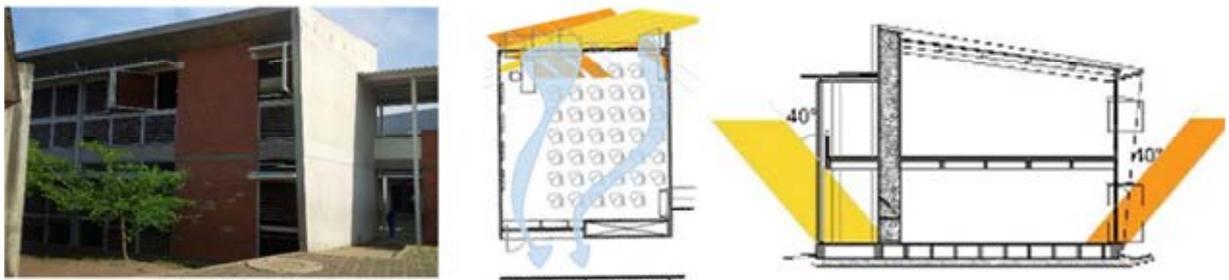


Figura 5: Aula 2 (piso 2)



Figura 6: Aula 7 (piso 1)

Sin embargo, en las aulas A1 y A2 se eleva en 1°C la temperatura (Figura 5), al igual que en las aulas A5 y A6, (Figura 7), en donde el incremento alcanza los 2°C, y en la noche, solo bajan hasta los 24°C, frente a los 21°C logrados en el A2. El anterior comportamiento para el caso de A5 y A6, es consecuencia de la incidencia de la radiación solar en forma directa sobre las ventanas, orientadas al noroeste y sureste, como también de la limitada ventilación selectiva, consecuencia de las ventanas cerradas una vez finalizada la jornada, y de las insuficientes persianas de ventilación hacia el corredor.



Figura 7: Aula 6 (piso 3)

Análisis del confort térmico a partir de los votos de sensación térmica

De los 535 alumnos, 263 (49.1%) manifestaron estar confortables, (Tabla 2), mientras 272, (50.8%), se encontraron en *discomfort*, de los cuales: el 32.1% manifestaron estar en situación de frío, en su mayoría en las aulas A7 y A8 y el 18.7% por situación de calor en las aulas A1 y A2 y A5 y A6, en donde se registraron las mayores temperaturas. El modelo teórico de la norma, indica una aceptación de 80% y 90% frente a un 20% o 10% de personas insatisfechas en un espacio confortable. En la presente investigación, la mayoría de los votos (263) estuvieron en las tres escalas centrales (49.1%), sin embargo, el PPD superó los niveles recomendados, alcanzando el 50.8% (272 votos), valores que no permiten estimar la prevalencia en la situación de confort.

COLEGIO	ESCALA DE SENSACIÓN TÉRMICA							TOTAL
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
ISAIAS	2,0	29,0	13,0	27,0	21,0	19,0	11,0	122,0
NELSON	3,0	38,0	18,0	33,0	28,0	16,0	10,0	146,0
NUEVO L.	2,0	32,0	10,0	19,0	39,0	19,0	13,0	134,0
JUANA	29,0	37,0	9,0	23,0	23,0	10,0	2,0	133,0
TOTAL	36,0	136,0	50,0	102,0	111,0	64,0	36,0	535,0

Tabla 2: Consolidado total de los votos de sensación térmica en los dos periodos

Confort Visual

Las condiciones de iluminación exterior registradas, son similares en los dos meses de la auditoria, debido a que corresponden a fechas cercanas a los equinoccios. Sin embargo, en las aulas A1, A2, A3 y A4 (Figura 8), el comportamiento es análogo por debajo de los 2.000 lux, mientras en las otras sobrepasan ese valor. En estas últimas, también se presentan valores (mínimos) por debajo de los recomendados (tabla 3).

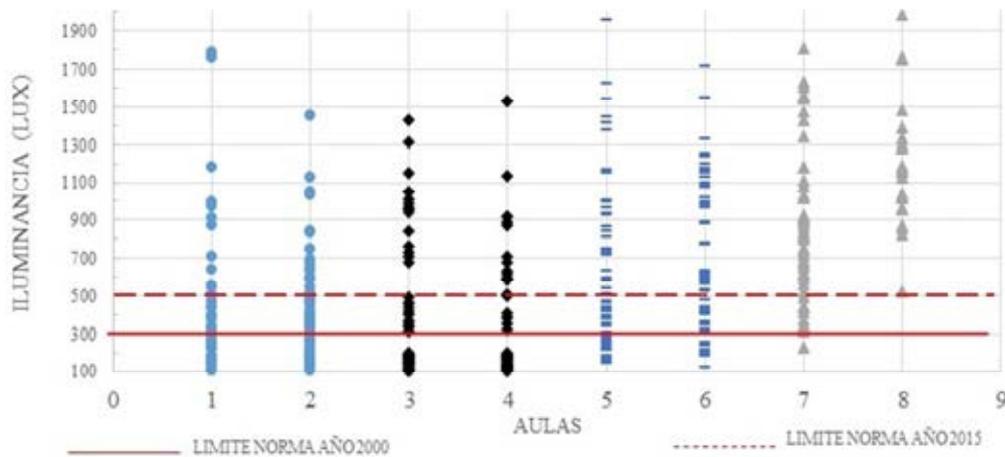


Figura 8: Mediciones de iluminancia (lux) en forma puntual sobre plano de trabajo (535 registros)

Las 4 primeras aulas A1 y A2, A3 y A4, tienen fachadas expuestas con mayor protección frente al impacto de la incidencia solar y su contacto visual con la bóveda celeste, en comparación con las A5, A6, A7 y A8 (Figura 9). Las A1 y A2 poseen persianas, mientras que las A3 y A4, una doble piel y un árbol que actúa como pantalla protectora (Figura 4). En marzo, como se muestra en la Tabla 3, en A2 el 33% del salón está por debajo de los 300 lux, y en A4 es el 81%, implicando que si bien la doble piel refuerza el sombreado y favorece la ventilación, limita en su diseño las condiciones de iluminación natural apropiadas dentro el aula. En A6 el 83% registró por encima de 500 lux, el 14% entre 500 y 300 Lux y solo el 2% por debajo de 300 lux. Esta última posee una iluminación lateral a partir de una ventana que ocupa el 100% de la fachada expuesta, con ingreso de luz directa, a la cual le han colocado cortinas oscuras para controlar los brillos molestos. El A9, posee iluminación bilateral logrando el 98% por encima de 500lux. Ambos salones presentan un alto grado de uniformidad, sin embargo, hay iluminancias excesivas cercanas a la envolvente (Figura 10). Por un lado, se reafirma lo acertado de contar con iluminación bilateral (aunque ventanas con fachadas sin suficiente protección solar implica iluminancias excesivas) y de tener colores claros al interior (algunos en muros y techo).



Figura 9: Interior de las aulas

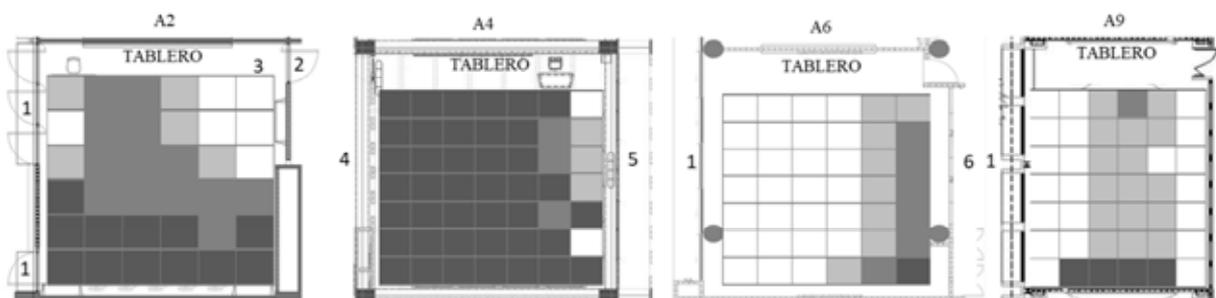


Figura 10: Iluminancia sobre puesto de trabajo en marzo (los colores corresponden a los rangos de la tabla 3). 1. Ventana; 2. Puerta con persiana abierta; 3. Tragaluz; 4. calados; 5. ventana hacia doble piel; 6. Persiana cerrada.

AULA	2	4	6	9
Porcentaje	%	%	%	%
INFERIOR A 300	33	81	2	0
ENTRE 500-300	36	7	14	3
ENTRE 750-500	3	7	19	45
SUPERIOR A 750	28	5	64	53

Tabla 3: Promedio Iluminancia y ubicación en el aula, días de la encuesta en marzo y agosto

A pesar de los bajos niveles de iluminancia (Tabla 3) y de su distribución en el aula (Figura 10), en A3 y A4, el 49% de los estudiantes consideran la iluminación como buena, y el 17% demasiada, evidenciando un cierto factor de acostumbramiento a condiciones desfavorables. El 82% manifestó la necesidad de encender las luces algunas veces durante el día, para equilibrar la baja iluminación natural. En ambas situaciones, las respuestas estuvieron distribuidas en todo el salón, sin relación directa con la ubicación en el aula (Figura 11).

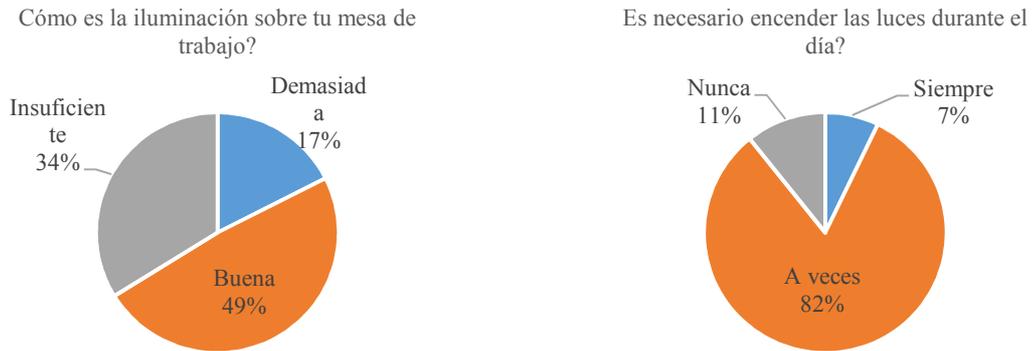


Figura 11: Opinión de la percepción de iluminación natural en el aula A3 y A4, meses de marzo y agosto

El Coeficiente de Luz Día (CLD) en las aulas A1 a A6, se registró por debajo del 2%, acorde con el valor mínimo establecido por la Norma NTC 4595, con excepción de las aulas A7 y A8, en las cuales se superará dicho umbral. (Figura 12).

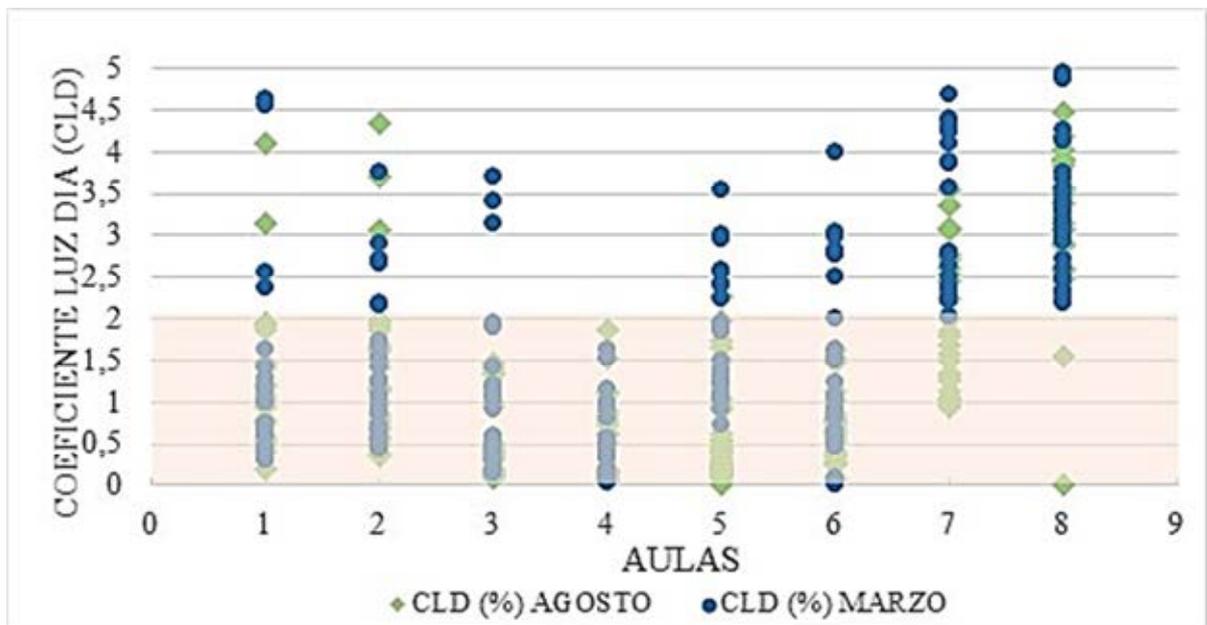


Figura 12: Coeficiente de Luz Día-CLD (%)

Confort Sonoro

Todas las aulas registraron una media energética del nivel sonoro continuo equivalente con la ponderación A (ruido de fondo) de 74.9 dB, sobrepasando los dos límites definidos por la norma en el año 2000 y 2015 establecidos en 40 y 45 dB, respectivamente (Figura 13). En cuanto al tiempo de reverberación, los valores registrados superaron el promedio de 1.22 segundos, cuando el rango permitido por la norma está entre 0.90 y 1.0.

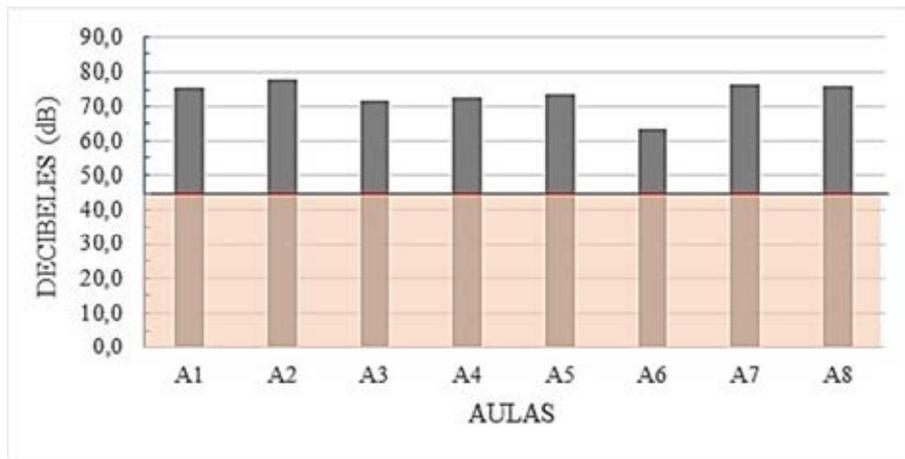


Figura 13: Media energética del nivel sonoro continuo equivalente con ponderación A

Si bien las aulas A5 y A6 tienen la posibilidad de cerrar las ventanas durante la jornada de clase y siendo las más “herméticas” del estudio, presentan niveles de ruido de fondo (media energética de 70.9 dB) que sobrepasan -al igual que en las demás- los máximos recomendados por la norma. Las A7 y A8 registraron los valores más altos, con una media energética de 76.3 dB, lo que evidencia el impacto de grandes vanos en las dos caras expuestas del aula. Las aulas mencionadas anteriormente, se encuentran en situaciones externas ruidosas: debido a cercanía vía principal, zona comercial y plaza de mercado (esta última solo para las A7 y A8). Las demás se encuentran en zonas de bajo ruido, residencial (A3 y A4), y en el límite de la ciudad (A1 y A2). Como se puede observar, el tema acústico es uno de los temas más sensibles del confort, ya que todos los valores exceden los límites recomendados. Esta conclusión es similar a estudios realizados en otros países latinoamericanos como: Argentina, Chile, Costa Rica, República Dominicana y Colombia (San Juan, Hoses, Martini, 2014).

CONCLUSIONES

La implementación de metodologías analíticas objetivas y subjetivas, permiten profundizar en el estudio del confort ambiental, o confort global (higro-térmico, visual y acústico) para poder establecer la relación entre los diferentes temas en la particularidad de cada caso.

El confort térmico bajo el modelo analítico, predijo una sensación térmica más cálida a la percibida por los estudiantes. Por otro lado, bajo el modelo adaptativo los resultados arrojaron una aceptabilidad mucho más baja, del 50.84%, frente al 80% recomendado, siendo inaplicables estos dos modelos en los casos de estudio.

En cuanto a la iluminación interior, se registran niveles insuficientes y falta de uniformidad en relación directa con el resultado del diseño de la fachada expuesta. El diseño referido a la uniformidad y niveles aceptables deriva de la adopción de fuente bilateral, y control/difusión a partir del diseño de la fachada expuesta.

En el tema del confort sonoro, todas las aulas registraron valores de ruido de fondo promedio superiores a los 70 dB, sobrepasando los límites definidos por la norma de 45 dB (NTC 4595), resultado de envolventes muy permeables para favorecer la ventilación cruzada; la que, además, no garantiza las temperaturas al interior dentro de los rangos de confort local.

Para alcanzar aulas en situación tropical-ecuatorial con calidad ambiental aceptable, es necesario aplicar estrategias proyectuales en relación al clima local y a la situación específica del proyecto, tales como aislamiento térmico, ventilación selectiva nocturna, mayor exploración de elementos de protección solar, y de los acabados interiores, para favorecer las condiciones lumínicas, además de un mayor abanico de materiales y posibilidades de adaptación acústica de los espacios, inexploradas en los cuatro casos del estudio.

Es necesario profundizar en estudios que se basen en análisis ambientales como el expuesto en el presente trabajo, simulaciones en estado estacionario o dinámico, y trabajo en terreno, que permitan una mayor comprensión de la relación entre las estrategias de diseño y su implicancia en el confort, como también, de la normativa local y los efectos de la misma en la calidad de los espacios para la enseñanza y aprendizaje.

REFERENCIAS

- Arango Díaz, L., Giraldo Vásquez, N., Cano Valencia, L., & Arenilla Cuervo, A. (2013). *Revisión de las recomendaciones sobre comodidad visual en ambientes escolares descritas en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595*. Dearq. Revista de Arquitectura, (13), 214-229.
- ASHRAE Standard (2010). 55 (2010). *Thermal environmental conditions for human occupancy*, 9-11
- ASHRAE Standard (2017). 55 (2017). *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- Baruah, P., Singh, M. K., & Mahapatra, S. (2014). *Thermal comfort in naturally ventilated classrooms*. In 30th International Plea Conference. Ahmedabad (pp. 1-8).
- Chiang, C. M., & Lai, C. M. (2008). *Acoustical environment evaluation of Joint Classrooms for elementary schools in Taiwan*. Building and Environment, 43(10), 1619-1632.
- García, V. I., Cáceres, C. A. H., & Peña, M. E. R. (2016). *Confort ambiental en escuelas públicas de Cali*. Universidad del Valle, Programa Editorial.
- Hwang, R. L., Lin, T. P., & Kuo, N. J. (2006). *Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan*. Energy and Buildings, 38(1), 53-62.
- Hwang, R. L., Lin, T. P., Chen, C. P., & Kuo, N. J. (2009). *Investigating the adaptive model of thermal comfort for naturally ventilated school buildings in Taiwan*. International journal of bio Meteorology, 53(2), 189-200.
- James, A.-D., & Christian, K. (2012). *An assessment of thermal comfort in a warm and humid school building at Accra, Ghana*. Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research, 3(1), 535-547.
- Kwok, A. G., & Chun, C. (2003). *Thermal comfort in Japanese schools*. Solar Energy, 74(3), 245-252.
- Ledesma, S. L., Gonzalo, G. E., Cisterna, M. S., Márquez Vega, S. G., Quiñones, G. I., & Nota, V. M. (2004). Evaluación comparativa de eficiencia de parasoles y su incidencia en la iluminación natural de aulas en San Miguel de Tucumán. *Revista AVERMA*, 8, 05-55.
- Liang, H. H., Lin, T. P., & Hwang, R. L. (2012). *Linking occupants' thermal perception and building thermal performance in naturally ventilated school buildings*. Applied Energy, 94, 355-363.
- Mastroizzi, J. A., Montes, C., Amura, S., & Mastroizzi, M. A. (n.d.). Guimaraes Portugal. *Estudio y pautas para el acondicionamiento acústico de aulas de edificios para la educación*, 1-8.
- Medina Valdez, A. *La calidad acústica arquitectónica el ambiente acústico en edificios escolares de nivel superior* (Disertación doctoral).
- Monteoliva, J. M., & Pattini, A. (2013). *Iluminación natural en aulas: análisis predictivo dinámico del rendimiento lumínico-energético en climas soleados*. Ambiente Construido, 13(4), 235-248.
- Murillo, F. J., & Martínez-Garrido, C. (2012). *Influence of the environmental conditions and academic performance in the Primary Education classrooms of Iberoamerica*. Education policy analysis archives, 20, 18
- Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Routledge.
- NTC, N. T. C. (2006). 4595. *Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares*.
- NTC, N. T. C. (2015). 4595. *Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares*.
- NTC 5316: *Condiciones Ambientales Térmicas de Inmuebles para Personas*.
- Pattini, A. (2000). *Recomendaciones de Niveles de Iluminación en Edificios no Residenciales: una comparación internacional*. Revista Avances en Energías Renovables y Medio ambiente, 4.
- San Juan, G., Hoses, S., Rojas, D., & Moreno, J. (1999). *Integración de la opinión de los usuarios en la evaluación ambiental de aulas escolares*. Avances en energías renovables y medio ambiente, ISSN, 0329-5184.
- San Juan, Gustavo A. (2008). *Comportamiento energético, productivo y ambiental de la gestión de redes edilicias de educación. Un enfoque sistémico en el continuo de las escalas del hábitat*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Salta. Argentina (UNSa).

- San Juan, G., Hoses, S., & Martini, I. (2014). *Aprendizaje en las escuelas del siglo XXI. Nota 5: Auditoría ambiental y condiciones de confort en establecimientos escolares.*
- Tablada, A., de la Peña, A., & De Troyer, F. (2005). *Thermal comfort of naturally ventilated buildings in warm-humid climates: field survey. Environmental Sustainability. The Challenge of Awareness in Developing Societies. Proceedings of Passive Low Energy Architecture (PLEA), Beirut, (November), 191–196.*
- Trebilcock, M., Bobadilla, A., Piderit, M., Guzmán, F., Figueroa, R., Muñoz, C. & Hernández, J. (2012). *Environmental performance of schools in areas of cultural sensitivity.* In Proceedings of PLEA 2012 (Passive Low Energy Architecture) Conference.
- Wong, N. H., & Khoo, S. S. (2003). Thermal comfort in classrooms in the tropics. *Energy and Buildings, 35*(4), 337–351.
- Wu, W., & Ng, E. (2003). *A review of the development of daylighting in schools.* *Lighting Research and Technology, 35*(2), 111–125.
- Zannin, P. H. T., & Zwirtes, D. P. Z. (2009). *Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools.* *Applied Acoustics, 70*(4), 626-635.
- Zhang, G., Zheng, C., Yang, W., Zhang, Q., & Moschandreas, D. J. (2007). Thermal comfort investigation of naturally ventilated classrooms in a subtropical region. *Indoor and Built Environment.*

ABSTRACT

The work presents the evaluation of the environmental quality (thermal, visual and acoustic) in relation to the norm, of the classrooms of four schools. The methodology used was of environmental audit, organized into two components: (i) objective, (measurements); and (ii) subjective, (perception survey). Likewise, the results were verified with local and international regulations. The results in terms of thermal comfort, show classrooms mostly in uncomfortable state. In the visual theme, insufficient natural lighting levels and lack of uniformity were recorded. Finally, the levels of background noise and reverberation time exceeded the normative limits for acoustic comfort, which are understood as the values needed to guarantee spaces with quality, for the learning activities inside the classrooms.

Key words: School classrooms, thermal, visual and acoustic comfort assessment, tropical climate.

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO HIGROTÉRMICO DE UN PROTOTIPO CON TEJAS DE MATERIAL COMPUESTO

Halimi Sulaiman¹, María Paz Sánchez Amono², Rosana Gaggino³, Celina Filippin⁴, María Josefina Positieri⁵

-Centro Experimental de Vivienda Económica (CEVE), dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Asociación de Vivienda Económica (AVE) Igualdad 3585, Córdoba Capital, CP 5003.Tel.: 0351 4894442

-Centro Regional del INTA La Pampa-San Luis CONICET

Av. Spinetto 785, Santa Rosa (6300), La Pampa, Tel: (54) 2954 430910

-Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC). Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria – Universidad Tecnológica Nacional.

Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC) Córdoba Capital, CP 5000.

Tel.: (54) 0351-598-6000, int.2150

Recibido 12/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: El concepto de Construcción Sustentable propone una profunda innovación en el diseño y producción de los elementos que conforman el hábitat humano. Se desarrollaron tejas en base a un material compuesto por polietileno y caucho reciclados implementando un nuevo procedimiento de fabricación que contribuye a dar un destino final adecuado a los residuos y sustituye materias primas de origen natural. En este trabajo se presenta el procedimiento de elaboración de un componente constructivo (teja) y los cálculos de Conductividad y Transmitancia térmica necesarios para solicitar el Certificado Aptitud Técnica (CAT) para este sistema constructivo en la Ciudad de Córdoba (Subzona Bioambiental IIIa). Se utilizó la hoja de cálculo del CEEMA (Centro de Estudios Energía y Medioambiente IAA.FAU.UNT). El valor del K calculado (0,76 W/m.k) ha resultado inferior al máximo establecido para invierno y verano para el nivel B y no presenta condensación entre capas ni condensación superficial, verificando la Norma.

Palabras clave: construcción sustentable, residuos, material compuesto, desempeño higrotérmico.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la excesiva generación de residuos influenciada por el acelerado crecimiento demográfico y los nuevos modelos de consumo de la sociedad, constituye uno de los más graves problemas medioambientales en el mundo. Dentro del volumen de residuos sólidos urbanos, los residuos de caucho y los de plástico ocupan un importante lugar.

En Argentina, más de 100.000 toneladas anuales de neumáticos fuera de uso son desechados en vertederos de residuos no controlados o se los elimina mediante quema directa, lo que produce emisiones de gases nocivos para el entorno. Demoran aproximadamente unos 600 años para empezar a degradarse, a la intemperie (INTI, 2010).

Los plásticos constituyen el 13,3% del total de los residuos sólidos urbanos (en peso) lo que equivale al 30% del total (en volumen) en la Argentina. Dentro de los plásticos se destaca por su cantidad el polietileno de baja densidad, ya que representa el 42,6% de los plásticos (CEAMSE 1992). Se usa

¹ Doctora. Investigadora Asistente CONICET

² Doctora. Becaria Postdoctoral CONICET

³ Doctora. Investigadora Independiente CONICET

⁴ Doctora. Investigadora Principal CONICET

⁵ Doctora. Docente investigadora UTN

principalmente en bolsas, bidones, caños, etc. Es un material que se produce a partir de combustibles fósiles y demora más de 150 años en degradarse, a la intemperie.

Una de las premisas del Desarrollo Sostenible es evitar el agotamiento de los recursos, mediante el reciclado y la recuperación de los residuos. En este trabajo de investigación se adhiere a esta premisa del Desarrollo Sostenible, por lo cual se ha desarrollado un componente constructivo para cubiertas de techos (teja) elaborado íntegramente a partir de residuos de caucho y de polietileno.

Otra de las premisas del Desarrollo Sostenible es ahorrar energía. En nuestro país, la Secretaría de Vivienda de la Dirección Nacional de Acceso al Suelo y Formalizaciones del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda adhiere a esta premisa, promoviendo el ahorro en climatización de los ambientes construidos, por lo cual a partir de julio del año 2017 solicita realizar el cálculo Higrotérmico de los sistemas constructivos, para solicitar o renovar los Certificados de Aptitud Técnica, y cumplimentar lo establecido para el nivel B de la Norma IRAM 11605.

En este trabajo de investigación se presentan los cálculos de Conductividad y Transmitancia térmica que fueron presentados para solicitar el Certificado Aptitud Técnica (CAT) de este sistema constructivo en la Ciudad de Córdoba (Subzona Bioambiental IIIa), según la normativa actual vigente en el país.

En el año 2015 se llevó a cabo la construcción de un prototipo con esta tecnología (Figura 1), con el objetivo de evaluar su desempeño técnico y tramitar el Certificado de Aptitud Técnica.

MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN

La fabricación de este material compuesto se lleva a cabo con una máquina extrusora para plásticos (Figura 2), en la que se combinan dos procesos: extrusión y moldeo por compactación. La mezcla compuesta por caucho (Figura 3) y polietileno de baja densidad -P.E.B.D. (Figura 4) se ingresa en la tolva de forma manual. Luego de ser calentada, esta pasta se extrude a través de un tornillo con tres zonas de calentamiento alcanzando una temperatura aproximada de 150-200 °C.

La mezcla caliente que sale de la extrusora se vuelca sobre la matriz (Figura 5) y finalmente se acciona la prensa para que descienda el molde superior aplicando fuerza sobre la pasta. El proceso dura aproximadamente durante cinco minutos, tiempo en el cual la pasta se endurece manteniendo la forma deseada. La teja debe ser colocada en un bastidor para que en su proceso de enfriamiento no se deforme. Luego del moldeado, la teja presenta rebabas de material que deben ser cortadas y retiradas. Luego de esto, la teja está terminada (Figura 6).



Figura 1: Vista del prototipo



Figura 2: Máquina extrusora



Figura 3: Partículas de caucho



Figura 4: Partículas de polietileno



Figura 5: Mezcla caliente sobre matriz



Figura 6: Teja terminada

Un procedimiento adicional opcional en la fabricación de las tejas consiste en el recubrimiento de las mismas con aditivos retardantes de llama. Las tejas sin recubrimiento tienen escasa resistencia al fuego, puesto que es conocido que tanto el caucho como el polietileno son materiales de fácil combustibilidad, y que emiten gases nocivos para la salud. Por esta razón se realizó una investigación en la institución CEVE experimentando con diferentes recubrimientos con aditivos retardantes de llama existentes en el mercado, y se realizaron ensayos de inflamabilidad según la Norma IEC 60695-2-11, denominada Ensayo del Filamento Incandescente. Finalmente, estableció que el material constitutivo de la teja es apto desde el punto de vista de la Inflamabilidad, cuando está recubierto con alguno de los siguientes recubrimientos: esmalte sintético negro mezclado con polvo de bórax; pintura intumescente marca Venier; y esmalte sintético negro mezclado con arena (Peisino et al, 2017).

SISTEMA CONSTRUCTIVO

El prototipo experimental utilizado fue una oficina de 26 m², ubicada en el CEVE, que tenía una cubierta de tipo tradicional, con tejas cerámicas francesas, sobre estructura de madera. Se colocó la membrana aislante hidrófuga controladora de vapor tipo Wichí, y se reemplazaron las tejas cerámicas francesas por las tejas elaboradas con materiales reciclados producto de esta investigación.

La estructura del prototipo es antisísmica, y consiste en vigas, columnas y platea de hormigón armado. Las paredes tienen 0,19 m de espesor total, y están compuestas por placas de ladrillo de tierra cocida de 5 cm de espesor (placas tipo “Beno”, desarrolladas en CEVE), con juntas tomadas con un mortero de cemento y arena gruesa; bolseado interior de 1,5 cm de espesor, y un revestimiento de ladrillo visto de tierra cocida de 12,5 cm de espesor.

La cubierta consiste de los siguientes elementos: tirantes de pino Saligne de 3" x 6", alfajías de pino Saligne de 1" x 2", listones de pino de ½" x 2", cielorraso de terciado de pino de 6 mm de espesor,

membrana aislante hidrófuga controladora de vapor tipo Wichi, capa de aislación térmica de poliestireno expandido de 40 mm de espesor, clavaderas de pino tipo Saligne 2" x 1", y tejas elaboradas con materiales reciclados, con las cumbreras del mismo material.

La teja francesa cerámica tiene un tamaño similar al de la teja elaborada con materiales reciclados producto de esta investigación, por lo cual se pudo reutilizar la estructura de listones y clavaderas existente en el prototipo. Esto se considerado una ventaja, ya que permite que la teja producto de esta investigación se adapte a un sistema de cubierta tradicional.

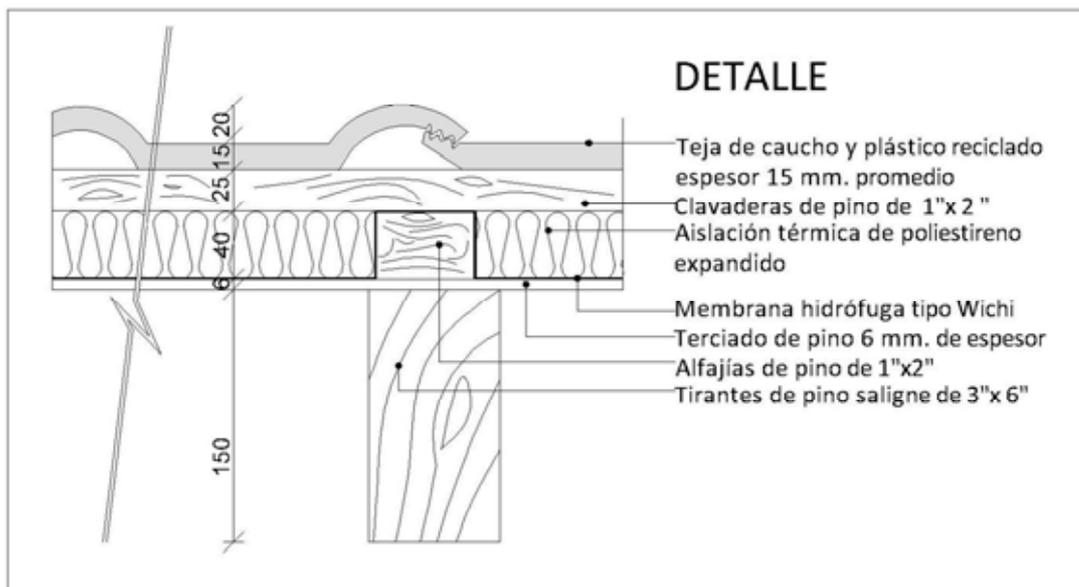


Figura 7: Corte del sistema constructivo de cubierta de madera con tejas de material reciclado.

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSMITANCIA TÉRMICA (K)

Para realizar los cálculos se tomó como referencia el prototipo (Figura 1) construido con un sistema estructural de techo inclinado de madera y cubierta de tejas de material reciclado. Se utilizó el software desarrollado en el Centro de Estudios Energía y Medioambiente -CEEMA- de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Tucumán (Gonzalo et al, 2005) (Gonzalo 1989).

El valor de permeabilidad al agua de las tejas de caucho y plástico fue obtenido mediante ensayo realizado bajo Norma IRAM 11632.1 para tejas de hormigón. Cumple con dicha Norma, la cual establece que no deben desprenderse gotas de agua en la parte inferior de las tejas durante la duración del ensayo. Los ensayos se realizaron sobre las tejas luego de transcurridos 7 días de la finalización del ensayo de heladicidad. El ensayo fue realizado en el Laboratorio del CINTEMAC (UTN-FRC).

Los valores de permeabilidad al agua de los otros materiales del sistema constructivo fueron obtenidos de la Tabla A6 "Permeabilidades al vapor de agua y permeancia al vapor de agua" de la Norma IRAM 11601:2002.

El valor de Absorción de agua fue establecido mediante ensayo realizado bajo Norma IRAM 12528.03 para tejas cerámicas. Cumple con dicha Norma, la cual establece que las tejas inmersas en agua por 24 horas no deberán absorber una cantidad de agua mayor al 15% de sus respectivas masas en estado seco. Porcentaje de absorción de agua: 0,3% (valor medio).

El valor de conductividad térmica (0,33 W/m.k) de la teja de caucho y plástico reciclado fue obtenido mediante ensayo según norma IRAM 11559 Acondicionamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente con guarda.

Los datos de conductividad térmica de los otros materiales del sistema constructivo fueron tomados de la Norma IRAM Nro. 11601 (versión año 2002) y del Manual práctico del EPS Poliestireno expandido, Aislamiento Térmico en la Construcción, de acuerdo a la Ley 13059 (Azqueta, 2014). Se destacan los parámetros claves en el cálculo correspondientes a la Norma IRAM 11603:2012) Córdoba (AERO) Zona IIIa: la temperatura exterior de diseño es de $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa exterior de diseño es 67% (ver Tabla 1).

El k_{max} admisible se calculó según la Tabla 1 de la norma IRAM 11605:1996. Para una $TED = -4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, los K_{max} admisibles son para los niveles A (ecológico) $= 0,28\text{ W/m}^2\text{K}$; B (recomendado) $= 0,72\text{ W/m}^2\text{K}$; y C (mínimo) $= 1,00\text{ W/m}^2\text{K}$. Las resistencias térmicas superficiales (R_s) se obtuvieron de la Tabla 2 de la norma IRAM 11601:2002. En el invierno, para un flujo de calor ascendente, corresponde un $R_{sinterior} = 0,13\text{ m}^2\text{ K/W}$ y un $R_{sexterior} = 0,04\text{ m}^2\text{ K/W}$.

CENTRO DE ESTUDIOS ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE - IAA - FAU - UNT

OBRA:	EJEMPLO DE APLICACION		
SITUACION:	OBRA EN CORDOBA		
OPERADOR:	NUEVOS MATERIALES- CEVE- CONICET		
FECHA:	12/11/2016		

CARACTERISTICAS DEL LUGAR	UNIDAD	VALOR	OBSERVACIONES
Nombre de la localidad:		CORDOBA	
Altura sobre el nivel del mar:	m	426	VER ANEXO 1
Zona bioambiental: (x)		3	Ingresar 1,2,3,4,5, ó 6
Tipo de cerramiento:		T	MURO = M - TECHO = T
Temperatura interior de diseño invierno: (x)	$^{\circ}\text{C}$	18	VER TMEDIS
Temperatura exterior de diseño invierno: (x)	$^{\circ}\text{C}$	-4,5	VER PLANILLA TMEDIS
Humedad relativa interior de diseño :	%	62	
Humedad relativa exterior de diseño:	%	67	VALOR PRESCRIPTO POR NORMAS
Presión de vapor interior:	kPa	1,35	
Presión de vapor exterior:	kPa	0,30	

CARACTERISTICAS DEL CERRAMIENTO	UNIDAD	VALOR	OBSERVACIONES
Características del cerramiento	Muro doble con aislación, revocado ambas caras		
Resistencia de cámara de aire invierno:	$\text{m}^2\text{.K/W}$	0,17	VER PLANILLA RECA
Resistencia superficial interior invierno:	$\text{m}^2\text{.K/W}$	0,13	VER PLANILLA RECA
Resistencia superficial exterior invierno:	$\text{m}^2\text{.K/W}$	0,04	VER PLANILLA RECA
Coefficiente absorción (color) sup.exterior:		0,78	VER PLANILLA COLOR
Resistencia de cámara de aire verano:	$\text{m}^2\text{.K/W}$	0,17	VER PLANILLA RECA
Resistencia superficial interior verano:	$\text{m}^2\text{.K/W}$	0,13	VER PLANILLA RECA
Resistencia superficial exterior verano:	$\text{m}^2\text{.K/W}$	0,04	VER PLANILLA RECA

Tabla 1: Datos considerados en el cálculo

La Tabla 2 muestra en detalle el cálculo de la transmitancia con todos los valores considerados. En dicha tabla se mencionan todas los materiales que componen las capas comenzando por el interior, es decir el R.S.I (resistencia superficial interior) hasta el exterior R.S.E. (resistencia superficial exterior). En las columnas en color amarillo se destacan los datos de la Norma obtenidos de las planillas específicas (conductividad, permeabilidad y permeancia).

Existen dos capas de aislación. La primera, de 0,04 m de espesor, se encuentra entre las alfajías en sentido de la pendiente de la techumbre. La segunda, de 0,025 m, se enmarca con las clavaderas en sentido opuesto. De este modo las alfajías se encuentran aisladas casi en su totalidad salvo en los encuentros de ambas estructuras de madera, minimizando el puente térmico.

CENTRO DE ESTUDIOS ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE - IAA - FAU - UNT

PLANILLA PARA LA INCORPORACION DE DATOS PARA CADA CAPA DEL CERRAMIENTO

N° Elem.	CAPAS	Espesor m	Conduc-tividad W/m.K	Resist. térmica m².K/W	Peso Espec. Kg/m³	Peso Unit. Kg/m²	VERIFICA K. SIND			VERIFICA QUE NO CONDENSE				
							MINIMO	SI VERIFICA	ECOLOGICO	NO VERIFICA	SUPERFICIAL	SI VERIF.	INTERSTICIAL	SI VERIF.
							RECOMEN.	SI VERIFICA	NO VERIFICA	NO VERIFICA	NO VERIFICA	NO VERIFICA		
	AIRE INTERIOR									1,35	18,00			
	R.S.I			0,130										
1	terciado de madera	0,0060	0,110	0,055	600	3,6	0,001		6,67	1,35	16,64	10,68		
2	wichi roof	0,0025	0,140	0,018	600	1,5	0,060		0,04	0,74	16,06	1,70		
3	EPS p. expandido entre alfajitas	0,0400	0,035	1,143	25	1,0	0,015		2,67	0,73	15,88	1,62		
4	EPS p. expandido entre clavaderas	0,0250	0,035	0,714	25	0,6	0,015		1,67	0,49	3,89	-3,56		
5	Teja de caucho	0,0150	0,330	0,045			0,040		0,38	0,34	-3,60	-7,37		
6										0,30	-4,08	-8,30		
7										INA	INA	INA		
8										INA	INA	INA		
9										INA	INA	INA		
10										INA	INA	INA		
11										INA	INA	INA		
	R.S.E			0,040						0,30	-4,50			
	AIRE EXTERIOR									0,30	-4,50			
	Esesor Total	0,089												
	Res. Ter. Tot.			2,145										
	Kv1/R2			0,466										
	Peso Total				6,73									
	Resis. paso vapor tot.									11,417				

Tabla 2: Cálculo de Transmitancia térmica de complejo de techumbre.
* Subcobertura hidrófuga y reguladora de Vapor (VCL)-WICHITEC.

Como se observa en la tabla 3 la techumbre propuesta verifica, no solo el Nivel C (obligatorio) sino también el Nivel B, recomendado por la norma. Los beneficios más relevantes se detallan en las conclusiones finales. El K (coeficiente de transmitancia térmica) que se calcula es un único valor.

TIPO DE K	VERANO	INVIERNO	VERANO C/COLOR	VERIFICACION
K calculado:	0,47	0,47		
K mínimo C	0,76	1,00	0,76	SI VERIFICA
K recomendado B	0,48	0,72	0,48	SI VERIFICA
K ecológico A	0,19	0,28	0,19	NO VERIFICA

Tabla 3: Verificación de la Transmitancia térmica (Según Norma IRAM 11605/96).

VERIFICACIÓN DEL RIESGO DE CONDENSACIÓN SUPERFICIAL E INTERSTICIAL

Se verificó del riesgo de condensación superficial (Tabla 4.9) e intersticial (Tabla 4.10) de acuerdo a lo establecido en la Norma IRAM Nro. 11603 (versión año 2012) y en la Norma IRAM Nro. 11625 (versión año 2000). Se incluye todo el cálculo además de sus resultados y el gradiente térmico.

CONDICIONES SUP. INT.	UNIDAD	VALOR	VERIFICACION
Presión de vapor interior	kPa	1,35	
Presión de vapor exterior	kPa	0,30	
Diferencia de temperatura (Ti-Te)	°C	22,50	
Resistencia superficial interior	m².K/W	0,17	
Caída de temperatura en la sup. int.	°C	1,75	
Temperatura de la superficie interna	°C	16,25	
Temperatura de rocío sup. int.	°C	10,68	NO CONDENSE

Tabla 4: Verificación a la condensación superficial

La tabla 4 demuestra que la tecnología propuesta no presenta condensación superficial. Cabe destacar la importante amplitud térmica del día a la que está sometida la techumbre (22,5 °C) según los nuevos valores de la Norma IRAM Nro. 11603 (versión año 2012).

VERIFICACIÓN A LA CONDENSACIÓN INTERSTICIAL

Por su parte, en esta tabla se detalla las temperaturas de cada capa del elemento constructivo considerando las resistencias superficiales en cada una de ellas y la temperatura real resultante. Si bien el valor obtenido de diferencia de temperatura es alto (22,50°C), esto indicaría la posible existencia de condensación. Aunque normalmente hay condensación intersticial en los sistemas constructivos tradicionales.

TEMP.DE CADA CAPA	DIF.TEMP	R.S.(n)	R.S.Tot.	Temp.Real
T INT	18,00			18,00
1° CARA	18,00			18,00
T 1	18,00	0,130		16,64
T 2	16,64	0,055		16,06
T 3	16,06	0,018		15,88
T 4	15,88	1,143		3,89
T 5	3,89	0,714		-3,60
T 6	-3,60	0,045		-4,08
T 7	#N/A	0,000	2,145	#N/A
T 8	#N/A	0,000		#N/A
T 9	#N/A	0,000		#N/A
T 10	#N/A	0,000		#N/A
T 11	#N/A	0,000		#N/A
ULT.CARA	-4,08	0,040		-4,50
TEXT	-4,50			-4,50

Tabla 5: Detalle de las temperaturas por cada capa del elemento constructivo.

Como se muestra en las Tablas 4 y 5 la techumbre propuesta no presenta condensación entre capas. Si en el gráfico existiesen cruces, ahí si se presentaría la condensación.

PRES.VAP. CADA CAPA	DIF.P.V.	R.Vap(n)	R.VapTot	Pres.Vap.	TemRoc.
P INT	1,35			1,35	
1° CARA	1,35			1,35	10,68
P 1	1,35			1,35	10,68
P 2	1,35	6,667		0,74	1,70
P 3	0,74	0,042		0,73	1,62
P 4	0,73	2,667		0,49	-3,56
P 5	0,49	1,667		0,34	-7,37
P 6	0,34	0,375		0,30	-8,30
P 7	#N/A	0,000	11,417	#N/A	#N/A
P 8	#N/A	0,000		#N/A	#N/A
P 9	#N/A	0,000		#N/A	#N/A
P 10	#N/A	0,000		#N/A	#N/A
P 11	#N/A	0,000		#N/A	#N/A
ULT.CARA	0,30			0,30	
P EXT	0,30			0,30	

Tabla 6: Detalle de la presión de vapor y las temperaturas de rocío en cada capa

Nº CAPA	TEMP.	TEMP.ROCÍO	VERIFICACIÓN
Aire interior	18,00		
terciado de madera	16,64	10,68	NO CONDENSA
wichi roof	16,06	1,70	NO CONDENSA
EPS p. expandido entre alfagias	15,88	1,62	NO CONDENSA
EPS p. expandido entre clavaderas	3,89	-3,56	NO CONDENSA
Teja de caucho	-3,60	-7,37	NO CONDENSA
0	-4,08	-8,30	NO CONDENSA
0	#N/A	#N/A	#N/A
0	#N/A	#N/A	#N/A
0	#N/A	#N/A	#N/A
0	#N/A	#N/A	#N/A
0	#N/A	#N/A	#N/A
Superficie exterior	-4,50	#N/A	#N/A
Aire exterior	-4,50		

Tabla 7: Verificación de la condensación intersticial.

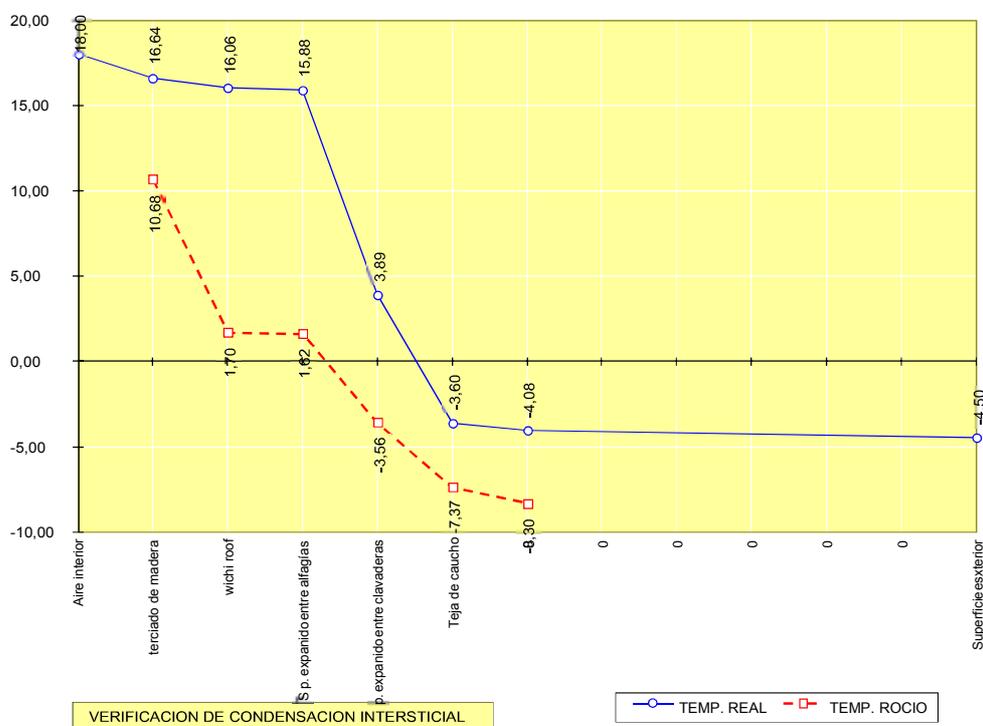


Figura 8: Verificación gráfica de la condensación intersticial

CONCLUSIONES

El componente constructivo desarrollado presenta ciertas ventajas con respecto a otros tradicionales (teja cerámica y de hormigón): menor densidad, mayor resistencia al impacto duro, menor permeabilidad al aire y menor absorción de agua, mayor resistencia a la flexión y menor conductividad térmica. El tamaño de la teja producto de esta investigación presenta una similitud con la teja francesa cerámica, por lo cual, el sistema es totalmente adaptable.

Con respecto al desempeño higrotérmico, la tecnología desarrollada cumple niveles B y C en las dos estaciones e incluso en verano con color. El valor del K calculado ha resultado inferior al máximo establecido para invierno y verano en la Norma IRAM Nro. 11605 (versión año 1996) para el nivel C. También ha resultado inferior al máximo establecido para invierno y verano para el nivel B, por lo

cual verifica la Norma. De este modo se cumple con los requerimientos para el CAT en la Subzona bioclimática IIIa. Para invierno, en base a la Norma anteriormente citada, Tabla 1 Valores de Kadmmmax para condición de invierno, la tecnología de techumbre de tejas con material reciclado cumple el Nivel C y el Nivel B en todas las localidades del país que presentan como temperatura de diseño exterior invierno entre 0°C y- 15°C. Para verano (Tabla 3 de la misma Norma) cumple el Nivel C en todas las zonas bioclimáticas del País. También cumple con el Nivel B para todas las zonas, salvo la I y II por solo 2 centésimas (K calculado = 0,47; K admisible verano B= 0,45). Esto se podría solucionar adicionando solo 3 mm a la aislación, lo cual es posible reformulando la altura de la estructura de madera.

De este modo el alcance de aplicación se extiende a casi todo territorio argentino con las connotaciones ecológicas y de ahorro energético que ello implica. Se deduce entonces, que la cubierta con tejas de materiales reciclados es eficiente desde el punto de vista de la aislación térmica.

NOMENCLATURA

Δt : diferencia de temperatura interior – exterior. λ : conductividad térmica.

CEVE: Centro Experimental de la Vivienda Económica

CINTEMAC: Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad INTI:
Instituto Nacional de Tecnología Industrial

IRAM: Instituto Argentino de Normalización K: Coeficiente de transmitancia térmica

P.E.: Polietileno P.P.: Polipropileno

PEBD: Polietileno de baja densidad R.s: Resistencia superficial

UTN: Universidad Tecnológica Nacional. TED: Temperatura exterior de diseño

REFERENCIAS

Azqueta, P. (2014). Manual práctico del EPS Poliestireno expandido, Aislamiento térmico en la Construcción de acuerdo a la Ley 13059 de la provincia de Buenos Aires y su Decreto Reglamentario 1030 de la Asoc. Argentina de Poliestireno Expandido (AAPE). (Primera edición). Buenos Aires.

Gonzalo G., Ledesma V, Nota V., Martínez C., Quiñones G., y Márquez Vega G. Conference paper: Metodología para el diseño bioclimático. Sustento informático para elección de pautas y estrategias. Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Tucumán. Noviembre de 2005.

Gonzalo G.E. 1989 Soporte lógico para el cálculo de propiedades termofísicas de elementos constructivos: Retardo-Amortiguamiento y CTT. FAU-UNT, Tucumán.

INTI. “Argentina comienza a reciclar neumáticos fuera de uso”. Noticiero Tecnológico Semanal N° 218. Publicación digital del 26 de julio de 2010.

Norma IRAM 11601 (2002) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Aislamiento térmico de edificios Métodos de cálculo Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Buenos Aires, Argentina.

Norma IRAM 11603 (1996). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico. Clasificación Bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina.

Norma IRAM 11559 (1995). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente con guarda.

Norma IRAM 11605 (1996). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico. Acondicionamiento Térmico de Edificios. Condiciones de Habitabilidad en Edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Buenos Aires,

Argentina.

Norma IRAM 11625 (1996). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Aislamiento térmico. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Verificación del riesgo de condensación de vapor de agua superficial e intersticial en paños centrales de muros exteriores, pisos y techos de edificios en general. Buenos Aires, Argentina.

Norma IRAM 11632.1 (2003) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Tejas y accesorios de hormigón. Requisitos. Buenos Aires, Argentina.

Norma IRAM 12528.1 (2003) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Tejas cerámicas de encastre. Parte 1: Definiciones y requisitos. Buenos Aires, Argentina.

PEISINO L., GAGGINO R., KREIKER J., SÁNCHEZ AMONO M., ARGUELLO R. Ensayo de inflamabilidad de tejas elaboradas a partir de caucho y polietileno reciclados. Revista Arquitecto.

Editorial: Red Regional de Tecnología de la Arquitectura de las Facultades de Arquitectura de Universidades Nacionales. Corrientes, Argentina. Edición digital. Disponible Online en: <http://arq.unne.edu.ar/publicaciones/arquitecto/archivos-pdf/arquitecto-10.pdf>. Número: 10. Noviembre de 2017. Pp.: 74 a 82.

Sánchez Amono, M. Estudio de la viabilidad de aplicación de polietileno y caucho reciclados para un sistema constructivo de cubierta. Tesis de Doctorado en Ingeniería, Mención Materiales. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Junio 2018.

ABSTRACT

The concept of Sustainable Construction proposes a profound innovation in the design and production of the elements that make up the human habitat. Roofing tiles were developed on the basis of a material composed of recycled polyethylene and rubber, implementing a new manufacturing process that contributes to a proper final destination for waste and replaces raw materials of natural origin. In this work the manufacturing process of a constructive component (roofing tile) and calculations of thermal conductivity and transmittance required are presented to request the Technical Aptitude Certificate (TAC) for this construction system in the City of Cordoba (Bioambiental subarea IIIa). The CEEMA spreadsheet (Center for Energy and Environment Studies IAA.FAU.UNT) was used. The value of the calculated K (0.76 W / m.k) has been lower than the maximum established for winter and summer for level B and does not present condensation between layers, and does present surface condensation, verifying the Standard.

Keywords: sustainable construction, waste, composite material, hygrothermal performance

ENSAYO DE DOSIFICACIONES PARA BLOQUES, LADRILLOS Y CONTRAPISOS DE HORMIGON CON DESECHOS PLASTICOS Y FINOS DE PERLITAS

Andrés E. Díaz¹ y Alejandro L. Hernández²

Instituto de Investigaciones de Energía No Convencional (INENCO)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta –CIUNSa
Av. Bolivia 5150, C.P. 4400 – Salta
Tel. 0387- 4255579 – Fax: 0387- 4255489. E-mail: andresmadara86@gmail.com

Recibido 09/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: En Salta Capital se arrojan 58 toneladas diarias de plástico, se recuperan solo 5 toneladas diarias. Los cuales son reciclados por tres cooperativas y un programa provincial. En la producción de Perlita Expandida el 20% de la perlita cruda se desperdician. Se propone como solución el desarrollo de mezclas de hormigón para la fabricación de ladrillos, bloques y contrapisos con agregados de Polietileno de Alta y de Baja Densidad y Finos de Perlita. Los agregados gruesos y finos fueron reemplazados en diversos porcentajes de volumen de mezcla por los plásticos reciclados. Se utilizó Perlita cruda en sustitución de una parte del cemento. Se desarrollaron 7 probetas por cada dosificación bajo Normas IRAM para el ensayo mecánico correspondiente a 7 y 28 días de curado. La densidad del hormigón bajo con el agregado de plástico y perlita. Las dosificaciones con 19% de agregado plástico superaron la mínima requerida para la resistencia a la compresión.

Palabras clave: Dosificaciones de hormigón, Ladrillos y Bloques, Polietileno de Alta y Baja Densidad, Perlita, Reciclaje.

1. INTRODUCCION

La construcción de la mampostería, que es una acumulación vertical de unidades de bloques o ladrillos y mortero, ha sido una técnica popular durante milenios porque otorga una construcción rápida, eficiente, duradera y económica. La continuación de esta tendencia histórica es posible siempre que la industria de mampostería siga siendo económica y sustentable. Para cumplir este objetivo, la industria de mampostería necesita explorar métodos alternativos que permitan la reducción de materiales no renovables, la energía utilizada en la producción de las unidades de bloque de hormigón y el costo de mano de obra, mientras se mantienen los mismos requisitos de rendimiento. Este estudio investiga el uso de materiales reciclados como alternativas para agregar y cementar en la producción de unidades de bloques y ladrillos de concreto, como así también en los contrapisos o pisos de hormigón.

El plástico es un material que forma parte en nuestra vida. Se usa en la industria automovilística, electrónica, edificios, etc. La producción de este material aumentó exponencialmente en los últimos años, lo cual ha llevado a un gran problema ambiental. El desecho de plástico no es un material biodegradable. Reciclar los desechos de plástico para producir nuevos materiales es una de las soluciones para deshacerse de las montañas de basura. Se realizaron varias investigaciones sobre el uso de diversos residuos de plástico como rellenos o agregados en hormigón, como el Tereftalato de polietileno (PET), (Choi, 2005), Poliestireno (PS), (Tang, 2008), Poliestireno Expandido, (Kan, 2009), Cloruro de Polivinilo (PVC), (Kou, 2009), Polietileno de Baja Densidad (LDPE, del inglés Low Density Polythene) (Chaudhary, 2014), Polietileno de Alta Densidad (HDPE, del inglés High

¹ Becario Doctoral del CONICET.

² Investigador Independiente del CONICET.

Density Polythene) (Naik, 1996), en residuos de E-plastic (plástico de alto impacto), en morteros (PET). Las investigaciones indicaron que el plástico reciclado podría reutilizarse como sustitutos parciales de la arena o agregado grueso, (Albano, 2009).

Las investigaciones revelaron que la incorporación de cualquier tipo forma o tamaño de los plásticos reciclados como agregados disminuye la densidad seca o densidad aparente, (Choi, 2005). Se obtuvieron una disminución del 29% en la resistencia a la compresión cuando el 15% del agregado grueso fue reemplazado por un agregado de polímero de reciclado post consumo con una relación agua / cemento de 0,42; sin embargo. Cabe señalar que la mayoría de las investigaciones sobre el uso de agregados de polímeros se han realizado sobre tereftalato de polietileno, comúnmente conocido como PET; el polímero utilizado para fabricar botellas de plástico. Otros polímeros, como el polietileno de baja y alta densidad, que poseen diferentes propiedades, no se han estudiado a fondo en esta aplicación.

(Ismail, 2008) propuso el uso de plásticos reciclados como reemplazo de agregados finos en concreto en un 10, 15 y 20%. Los resultados muestran que la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión disminuyen al aumentar la cantidad de agregados de plástico reciclado. (Da Silva, de Brito, R. Veiga, 2014) estudiaron la utilización de residuos de plástico de alto impacto como áridos finos y gruesos en concreto con un porcentaje de reemplazo que varía entre 0%, 10%, 20 y 30%, el estudio también muestra que las propiedades mecánicas del concreto contienen los desechos de plásticos E son más bajos que el concreto sin estos desechos.

Varios review están disponibles sobre el uso de los plásticos reciclados en la fabricación de hormigón o mortero, (Sharma R., 2016). En este trabajo se ensayó hormigón con agregados de HDPE y LDPE, también se propone el estudio sobre elementos cementicios con la incorporación de adiciones residuales como el uso de perlita natural sin procesar, (Burgos, Fernández y Aramayo, 2015).

Los estudios relacionados con hormigón sustentable, con sustitución del agregado grueso y fino por plásticos reciclados de Polietileno de Alta y Baja Densidad más finos de Perlita, se caracterizan por ser innovadores ya que existe una deficiencia de investigaciones con este tipo de residuo plástico y poca bibliografía al respecto.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

El desafío de este ensayo es realizar una mezcla con la incorporación de plástico reciclado y perlita sin expandirse, como reemplazo del agregado grueso, fino y de cemento, y que conserve sus características reológicas en estado fresco, aplicando las normas IRAM 1536, 1562 y 1662. En estado endurecido el objetivo es lograr un hormigón estructural que es el ingrediente de los bloques de hormigón, siguiendo las normas IRAM 11556 “Mampostería de bloques de hormigón” y la Norma IRAM 11561 “bloques huecos de hormigón” en donde especifican una resistencia mínima a la compresión en la sección bruta de los bloques de 50 Kg/cm² (5 MPa) a la edad de 28 días. Con la norma IRAM 1546:1992 se realizó el ensayo de compresión axial a los 7 días y 28 días.

Se fabricaron varias familias de hormigones en función de los plásticos y perlita disponibles, para poder estudiar el efecto que tienen dentro de la mezcla cementicia. Variando en la relación agua/cemento, porcentaje de áridos gruesos y finos, y finalmente el reemplazo de cemento por perlita; se orientó más específicamente en la trabajabilidad de la mezcla, ya que el hormigón será destinado para la fabricación de ladrillos de hormigón prensados y bloques diseñados en máquinas de alta vibración. También prestando atención a la disminución de la densidad y la conductividad térmica.

Cemento pórtland; Se trabajó con el tipo de cemento denominado según la norma IRAM 50000 (2010) como cemento portland compuesto (CPC30), cuya elección se debe a la disponibilidad y fácil acceso en el mercado local. Se obtiene mediante la molienda de Clinker pórtland y pequeñas cantidades de sulfato de calcio, más un porcentaje máximo de hasta 35% de una combinación de al menos dos de las siguientes adiciones Minerales: Escoria granulada de Alto Horno, Puzolanas y/o Filler Calcáreo. Entre sus usos están estructuras en general, albañilería, suelo cemento, elementos

prefabricados, bloques, Tejas de hormigón, etc. Se analizaron mezclas con contenidos de 260 Kg de cemento por m³ de hormigón, su densidad es 3,10 Kg/dm³.

Materiales reciclados; Para este trabajo se utilizaron dos tipos de plásticos reciclados provenientes de dos plantas recicladoras situadas en la ciudad de Salta Capital. A continuación, se detallan las características de los plásticos utilizados:

Polietileno (PE); Es químicamente el polímero más simple. Se obtiene de la polimerización del etileno, de fórmula química CH₂=CH₂ y llamado eteno por la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada), del que deriva su nombre. Según el proceso de polimerización pueden producirse resinas plásticas de alta o baja densidad. Es una poliolefina, un termoplástico semicristalino, que se caracteriza por una buena resistencia química y buen aislamiento eléctrico. La dureza del polietileno es una consecuencia de su estructura cristalina. Cuanto mayor es su estructura cristalina, tanto más duro y rígido es el producto. Se puede transformar con facilidad por los sistemas convencionales de producción. Es uno de los grupos de plásticos más utilizados en diferentes aplicaciones.

Polietileno de Alta Densidad (HDPE): Se produce por proceso de polimerización a bajas presiones. Actualmente se define solamente por su rango de densidad que va desde 0,941 g/cm³ hasta 0,965 g/cm³. Es una poliolefina de cadenas lineales; utilizado para fabricar botellas de leche, jugo, agua y productos de limpieza. Las botellas de PEAD no pigmentadas son translúcidas, muy buenas barreras al vapor de agua y duras. Las pigmentadas son de mayor resistencia química que las no pigmentadas, propiedad necesaria para el envasado de artículos de limpieza. Los productos de HDPE fabricados por inyección son resistentes a quebraduras y deformación, (Sánchez, 2015). En este trabajo se utilizó el HDPE reciclado proveniente de la planta recicladora de PETIT Salta. En la Figura 1 se muestra el tamaño de ambos polietilenos.

Polietileno de Baja Densidad (LDPE): Se produce por el proceso de polimerización a alta presión. Según este proceso se fabrica la mayor parte del polietileno. Actualmente se define solamente por su rango de densidad que va desde 0,910 g/cm³ hasta 0,925 g/cm³. Es un plástico que se utiliza principalmente para la fabricación de películas (films) debido a su tenacidad, flexibilidad y relativa transparencia. El LDPE alcanza un punto de fusión elevado, lo cual le otorga preferencia en la opción para aplicaciones donde se necesita sellado térmico, (Sánchez, 2015). Se usa comúnmente para fabricar películas flexibles para bolsas de venta por menor u otras. EL LDPE también se utiliza en diferentes películas coextrudadas o laminadas que se utilizan para el envasado de diferentes productos alimenticios, cosméticos, etc.). El LDPE utilizado proviene de la planta recicladora ECO NORTE S.R.L., Figura 1.

En el vertedero San Javier de la Ciudad de Salta, tres Cooperativas de Reciclado e Inclusión trabajan para la recogida y clasificación de materiales reciclables, como así también para el procesamiento y el envío a las plantas recicladoras. La mayor parte del material recogido procede del trabajo informal de los cartoneros o la recogida selectiva de los programas municipales como el programa “Separemos Juntos”.



Figura 1; A la izquierda el LDPE y a la derecha de color verde el HDPE.

Las cooperativas del Vertedero reciclan los materiales y vende el material a recicladores privados como ECONORTE SRL y PETIT Salta, quienes realizan el siguiente proceso:

- Selección manual.
- Trituración bajo chorro de agua.
- Extrusión.
- Granulado (rigidez, fluidez, color).

El sistema se inicia con una selección manual de los plásticos; luego se alimenta con esta materia prima la trituradora, se realiza la trituración y desmenuzamiento mediante calor y chorro de agua; luego el material se transporta hasta un recipiente donde se distribuye y enfría. Una vez enfriado el material es introducido en la extrusora que ablanda el material convirtiéndolo en rolos de plástico. El material sale caliente y es transportado en un medio refrigerante, luego se lo introduce en un molino donde se tritura hasta la forma final de pellets, para ser envasado y suministrado como materia prima, Fig. 1.

Granulometría del plástico; La granulometría de los plásticos reciclados se procedió de igual manera que para los agregados de peso normal según norma IRAM 1505, 2005.

Adiciones minerales; El mineral de Perlita es una roca de origen volcánico, con la propiedad saliente de tener del 2 al 7 % de agua en estado de adsorción. Este mineral tiene la propiedad de expandirse cuando se lo calienta lo suficiente. En la provincia de Salta están asentada 9 de las 10 compañías que la producen (la otra esta en Mendoza). Por esta capacidad de multiplicar su tamaño varias veces, la perlita pierde densidad y permite ser utilizada como filtrante para vinos, jugos y aceites comestibles, también como aislante térmico para obras de ingeniería y como sustrato en la agricultura.

La perlita cruda, tal cual se extrae del suelo, es sometida a altas temperaturas de entre 850 y 900 °C durante su industrialización, esto provoca que el agua atrapada en su interior se convierta en vapor y escape, esto produce la perlita expandida, que se utiliza como árido liviano. Por esta razón física es que el material se expande de siete a dieciséis veces con respecto a su volumen original. La perlita utilizada en este trabajo viene de la ciudad de San Antonio de Los Cobres provincia de Salta y su obtención viene a partir de un origen volcánico, se obtiene de canteras, donde trabaja actualmente la minera IMERYS, y la cual extrae en forma diaria aproximadamente 100 Tn/día. De dicha extracción de las canteras el 20 % es residuo y es lo que se utilizara como agregado a la mezcla cementicia. En el presente trabajo se utilizaron finos de perlitas desechados por la industria minera y como puede verse en la Figura 2, en estado pulverulento y con finura similar al cemento.



Figura 2; finos de perlita utilizados en esta investigación.

La perlita residual tiene una densidad cercana a 2600 Kg/m³ y un porcentaje de absorción de los 30 %, en cambio la perlita expandida tiene típicamente una densidad de 30–150 Kg/m³.

Aditivos; Se utilizó un superligante cuya característica de elección se basó en el tipo de consistencia de la mezcla que se realizó. El superligante es una emulsión sintética de color blanco, a base de polímeros acrílicos deseada para brindar una óptima adherencia e incrementar las propiedades mecánicas en

mezclas de cemento, no es corrosivo. Su densidad es $1,02 \text{ Kg/dm}^3$, el intervalo de dosis recomendada es 0.1 % a 5 % por los Kg totales de cemento utilizado por m^3 de hormigón, en este trabajo se utilizó una dosis del 0,63 % de superligante.

Agua; Las mezclas se realizaron utilizando agua potable de red basadas en la norma IRAM 1601,2012. El reglamento CIRSOC 201 (2005), normaliza que el agua empleada para lavar los agregados y mezclar y curar el hormigón, cumplirá con los requisitos establecidos en dicha norma.

Agregado grueso y agregado fino; En cuanto a los agregados gruesos y finos se utilizaron los provenientes del río Rosario de la provincia de Salta, se escogieron estos agregados por lo común que son utilizados en nuestra zona, los mismos se muestran en Figura 3.

Granulometría; La granulometría de los agregados gruesos se llevó a cabo aplicando la norma IRAM 1505, 2003 para el tamaño máximo de agregados, la norma IRAM 1533, 2002 para sacar las densidades y finalmente la absorción con dicha norma. Para la granulometría de los agregados finos se aplicaron las normas IRAM 1505, 2003 para el Módulo de Finura, la norma IRAM 1520, 2002 para el cálculo de la densidad relativa y la absorción del agregado fino.



Figura 3; Agregado grueso y agregado fino.

Probetas; Se fabricaron 7 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto para cada tipo de dosificación. Todas las probetas se moldearon según procedimiento de la norma IRAM 1534, 2004, los moldes utilizados se muestran en figura 4. Una vez preparadas las probetas se mantuvieron en sus moldes por 24 hs cubiertas para no perder humedad. Pasadas las 24 hs se desmoldaron e introdujeron en una pileta de curado, hasta la edad de ensayo correspondiente.



Figura 4; preparación de las probetas y pileta de curado de las muestras.

Procedimiento de mezclado; la mezcla se amasó en una hormigonera de tambor basculante de 60 litros de capacidad, Figura 5. El procedimiento de mezclado tuvo el primer lugar la humectación de la

hormigonera para que no afecte en la dosificación, luego se comenzó con el procedimiento de mezclado se introdujo el agregado grueso, luego se colocó el agregado plástico, posteriormente el agregado fino ambos en condición de superficie seca y saturada. Luego se agregó un tercio del agua de mezclado y se mezcló por unos minutos hasta lograr que se unificaran. Luego se agregó el cemento y la adición mineral, en caso de corresponder, y se mezcló para homogeneizar la mezcla durante un minuto. A continuación, se añadió el agua de mezclado restante en dos etapas. Una primera, aproximadamente 60% del agua de dosificación y el otro 20% restante junto con el aditivo superligante. Se amasó todo durante 7 minutos, se verificó la homogeneidad de la mezcla, y finalmente se procedió a realizar la medida del asentamiento del cono de Abram, IRAM 1536, 1978.



Figura 5; balanza utilizada para las dosificaciones y a la derecha la hormigonera.

Resistencia a compresión axial

Se determinó la resistencia a compresión axial según norma IRAM 1546, 2013. Las probetas permanecieron en cámara de curado hasta ser ensayadas para ambos días, antes del ensayo. Se ensayaron con prensa hidráulica, antes del ensayo las probetas fueron llevadas a horno (aplicando norma IRAM 1553:1983) para encabezarlas con un agregado compuesto por azufre y arena fina, el cual consiste en ponerle una tapa y base muy fina de espesor, pero de igual diámetro que la probeta, el objetivo es que ambas bases de la probeta sean paralelas y perpendiculares al eje de aplicación de la fuerza de compresión ejercida por la prensa de ensayo. En la Figura 6 se muestran la prensa durante el ensayo y las probetas después del encabezado. La resistencia a la compresión está dada por la relación entre la carga máxima de rotura y la sección transversal de la probeta. Con la ec. (1) calculamos la carga de rotura:

$$P = Div * 203.5 \frac{Kg}{Div} \quad (1)$$

Finalmente con ec (2) obtenemos la resistencia a la compresión:

$$F'_b = \frac{P}{3,14 * d^2/4} * 10^{-1} \quad (2)$$

Donde:

$F'_b =$ Resistencia a la compresión [MPa]

$P =$ Carga de rotura $\left[\frac{Kg}{Div} \right]$

$d =$ diametro [cm]



Figura 6; prensa hidráulica de medida de resistencia a la compresión y probetas encabezadas.

Dosificación

Los cálculos de las dosificaciones de las mezclas se basaron en el “diseño racional de mezclas de hormigón” método desarrollado por el Instituto de Cemento Portland Argentino (ICPA, 2018)”.

RESULTADOS

Elección del cemento a emplear; se trabajó con el cemento portland compuesto (CPC30), cuya elección se debe a la disponibilidad y fácil acceso en el mercado local.

Consistencia adecuada; se eligió de 2 ± 1 cm, la elección de la consistencia se basó en hecho de que la mezcla será utilizada para la fabricación de bloques por vibración y para ladrillos prensados. En la figura 7 se muestra el ensayo por el cono de Abrams.



1.

Figura 7; prueba del cono de Abrams

Distribución granulométrica de agregados

Agregado grueso; el cálculo de la densidad y la absorción se muestran en Tabla 1.

Propiedades	Agregado grueso
Tamaño máximo [mm] (IRAM 1505:2003)	19,1
Densidad relativa (IRAM 1533:2002)	2,646
Densidad relativa (IRAM 1533:2002)	0,7

Tabla 1; propiedades físicas del agregado grueso.

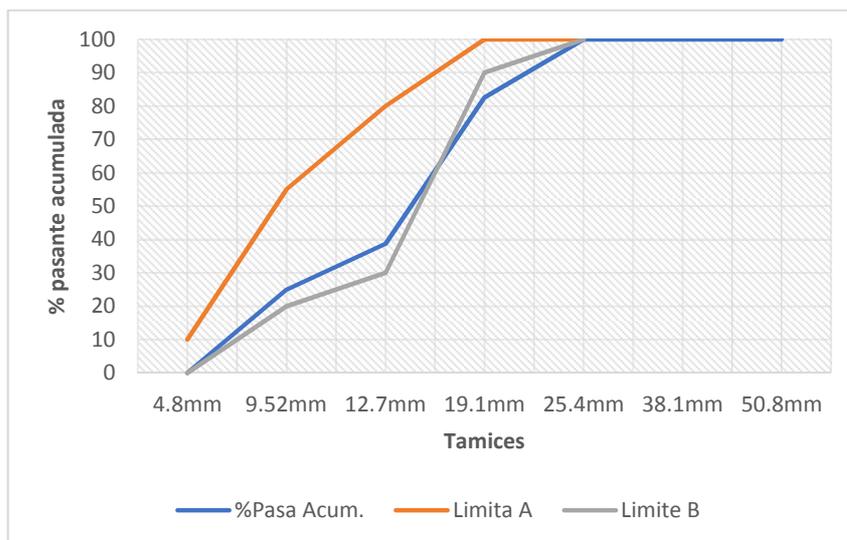


Gráfico 1; curva granulométrica del agregado grueso.

En los gráficos 1, 2 se presentan las curvas granulométricas de los agregados gruesos, finos, todas las curvas cumplen con los límites establecidos por el reglamento CIRSOC 201 (2005) y la Norma IRAM 1627, 1997. Las curvas granulométricas son continuas y están comprendidas entre las curvas límites. En el caso del agregado grueso, gráfico 1, se observa que en el tamiz de 19,1 mm el porcentaje de acumulados es más bajo que el de las curvas límites.

Agregado fino; en el Gráfico 2 se muestran los resultados de la granulometría del agregado fino, la curva es continua y cumple la norma 1627, 1997, tenemos que para el tamiz 2,4mm del agregado fino es un poco bajo para el límite A. En la Tabla 2 se detallan los resultados del cálculo de la densidad, módulo de finura y porcentaje de absorción.

Propiedades	Agregado fino
Módulo de Finura (IRAM 1505:2003)	3,75
Densidad relativa (IRAM 1520:2002)	2,645
Absorción [%] (IRAM 1520:2002)	0,8

Tabla 2; propiedades físicas del agregado fino.

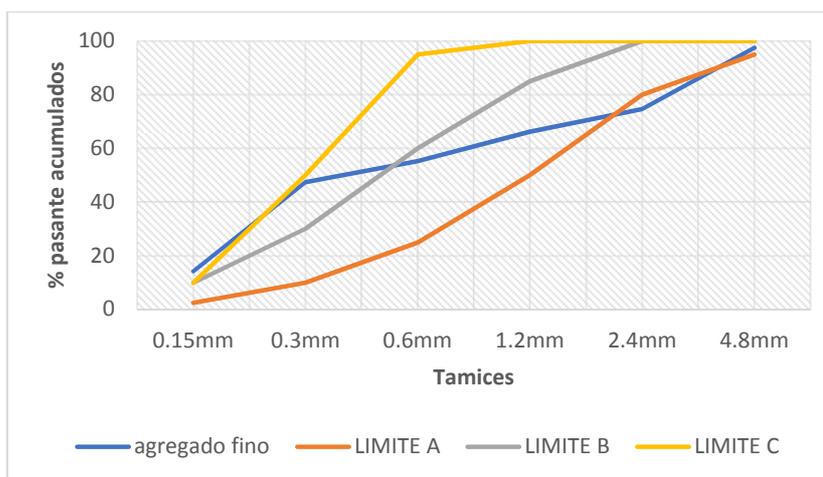


Gráfico 2; curva granulométrica del agregado fino.

Granulometría del plástico; Para conocer la granulometría de los plásticos reciclados se procedió de igual manera que para los agregados de peso normal según norma IRAM 1505 (2005). Las propiedades físicas se detallan en Tabla 3.

Propiedades	HDPE	LDPE
Tamaño máximo mm	5	5
Densidad relativa	0.92	0.89
% absorción	11	10

Tabla 3; propiedades físicas de los plásticos reciclados.

Determinación de la cantidad de agua estimada de la mezcla; la cantidad de agua de la mezcla viene dada por en función del asentamiento elegido y el Módulo de Finura (MF) del agregado total, (ICPA Abaco 1, 2018). El asentamiento seleccionado fue 2 ± 1 cm y el MF del agregado total resulto 5,97.

Estimación de la relación a/c máxima; la relación agua/cemento necesaria fue calculada en función de la resistencia media a la edad de 28 días para las distintas categorías de cemento, (ICPA Abaco 2, 2018), la relación ensayada fue 0,45.

El Cálculo del contenido unitario de cemento y la determinación de la cantidad de agregado (fino, grueso, de perlita y de plástico) por diferencia a 1000 de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado se detallan en la tabla 6. Este volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso 4. Para obtener la columna del peso SSS (Superficie Seca y Saturada) se multiplica cada peso del agregado por el término $(1+A\%/100)$. Los valores correspondientes al cemento y el agua no cambian, es decir, se transcriben los de la primera columna. La tabla 6 detalla los valores calculados para las dosificaciones de la probeta de control (CA) y la probeta con 19% de agregado plástico (P19A).

componentes	CA (Kg)	CA Volumen solido (dm ³)	CA Peso SSS (Kg)	P19A Volumen solido (dm ³)	P19A Peso SSS (Kg)
Agua	155	155	155	155	155
Cemento	344,5	111,13	344,5	111,1	344,5
Ag. grueso	1032,75	389,72	1105,05	315,7	895,17
Ag. fino	876,22	331,9	955,08	331,99	955,31
Ag. Plástico	0	0	0	74	73,26
Aire	10	10	10	10	10
Aditivo	2,17	2,21	2,17	2,2	2,24
SUMA	2420,64	1000	2571,79	1000	2435,48

Tabla 6; dosificaciones calculadas para cada Probeta.

componentes	control	19% PL AG	37% PL	19% PL y AF	19% PL y PE
Agua	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Cemento	2,60	2,60	2,59	2,59	2,10
Ag. grueso	13,64	10,33	8,03	10,94	9,99
Ag. fino	8,16	7,49	7,49	7,52	7,21
Ag. Plástico	0	0,78	1,52	0,60	0,079
Aire	0	0	0	0	0,1
Aditivo	0,02	0,016	0,016	0,016	0,013
perlita	0	0	0	0	0,49
SUMA	25,81	22,60	21,0	23,08	22,10

Tabla 7; peso en Kg de cada componente de la mezcla.

La tabla 7 muestra el peso de cada componente de las mezclas con que se formaron las probetas, para 19% de agregado plástico (19% PL AG), 37% de agregado plástico (37% PL), 19% de agregado plástico con 31% de agregado fino y 50% de agregado grueso (19% PL y AF), finalmente 19% de agregado plástico más el remplazo del 19% de cemento por finos de perlita (19% PL y PE). Se puede

apreciar como la densidad de la mezcla va disminuyendo conforme aumenta la cantidad de agregado plástico.

Resistencia a compresión axial; en las Tablas 8 y 9 se muestran los resultados de las probetas ensayadas para los días 7 y 28 de curado.

probeta	Peso (Kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Densidad (Kg/m ³)	División medida a los 7 días	Carga de Rotura [$\frac{Kg}{Div}$]	F' _b [MPa] a los 7 días
CA	3,605	20,05	10,03	2296	20	4070	5,2
P19A	3,302	20,05	10,10	2103	19	3866.5	4,8
P1A	3,054	20,15	9,98	1945	7	1424.5	1,8
P3A	2,981	20,05	10,10	1898	8	1628	2,0
PA	3,137	20,05	10,05	1998	7	1424.5	1,8
CB	3,630	20,20	10,05	2312	21	4273.5	5,4
P19B	3,322	19,95	10,10	2115	13	2645.5	3,3
P1B	2,947	20,15	9,53	1877	4	814	1,1
P3B	3,094	20,05	10,03	1970	11	2238.5	2,8
PB	3,147	20,10	10,03	2004	10	2035	2,6

Tabla 8; valores medidos de resistencia a la compresión a los 7 días de curado y densidades de las probetas.

De Tabla 8 se aprecia que a los 7 días de curado las probetas de control (CA, CB) son las que más resistencia a la compresión tienen como era de esperarse, les siguen las probetas con 19% de agregado de plástico (P19A, P19B), las probetas con 37% de agregado plástico (P3A, P3B), las probetas con agregado de 19% de plástico con 19% de perlita (PA, PB) y finalmente las que menos resistencia a la compresión presentan son las probetas con 19% de agregado plástico con 31% de agregado fino y 50% de agregado grueso (P1A, P1B).

probeta	Peso (Kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Densidad (Kg/m ³)	División medida a los 28 días	Carga de Rotura [$\frac{Kg}{Div}$]	F' _b [MPa] a los 28 días
CA	3,589	20,15	10,03	2286	39	7936.5	10,3
CB	3,564	20,25	10,00	2270	30	6105	7,9
P19A	3,380	20,05	10,04	2152	40	8140	10,6
P19B	3,383	20,15	10,03	2155	25	5087.5	6,6
P1A	3,156	19,85	9,90	2010	11	2238.5	2,9
P1B	3,025	20,25	9,10	1927	8	1628	2,1
P3A	3,092	20,25	10,03	1969	15	3052.5	4,0
P3B	3,312	20,05	10,05	2110	18	3663	4,8
PA	3,199	20,05	10,00	2038	15	3052.5	4,0
PB	3,176	20,15	9,90	2023	15	3052.5	4,0

Tabla 9; valores medidos de resistencia a la compresión a los 28 días de curado y densidades de las probetas.

De la Tabla 9 las probetas que superaron la resistencia a la compresión mínima requerida por la norma IRAM 11561 a los 28 días de curado, fueron las probetas CA, CB, P19A y P19B, mientras que las probetas P3A, P3B, PA y PB están a 1 MPa de superar la mínima requerida por la norma. Las probetas P1A y P1B fueron las que menos resistencia registró y por ende no llegan a la mínima requerida por la Norma.

La Densidad de las mezclas de hormigón bajó conforme se agregaron plástico y perlita cruda en sustitución de agregados grueso, fino y de cemento, Tablas 8 y 9. La densidad de las mezclas de control CA y CB se redujeron en un 18% respecto a las probetas P3A, P3B, P1A y P1B, mientras que la misma bajo un 13% en las mezclas PA y PB. Finalmente las probetas P19A y P19B mostraron una reducción del 9% con respecto a las probetas de control.



Figura 8; probetas después del ensayo.

En la figura 8 se aprecia como quedaron las probetas luego del ensayo de resistencia a la compresión axial. La foto de la izquierda es la probeta de control mientras que la foto de la derecha es la probeta con agregado plástico, ambas presentan una buena distribución de los agregados como así también muy buena adherencia.

CONCLUSIONES

- 1.El reemplazo de arena y piedra por agregados de polímero reciclados al 19% mostro el doble de la resistencia a la compresión axial exigida por la Norma, mientras que la sustitución del 37% de agregado plástico no llego a la mínima requerida por dicha Norma. Una mayor adición de plásticos da como resultado el agrietamiento de partes de la probeta, debido a la naturaleza hidrófoba de los polímeros.
- 2.La adición de agregados de polímero al 37% afectó adversamente la resistencia de las probetas reduciéndola en un 50%. Con un contenido de agregados plástico del 19%, la resistencia de la probeta disminuyó entre 10% y 30%, dependiendo del tipo de polímero.
- 3.La densidad de las mezclas disminuyó con el reemplazo de arena y piedra por agregado de polímero, incluso con bajos reemplazos de los agregados finos y gruesos. Se redujo en un 18% para las mezclas con 37 % de agregados plásticos y en un 9% para las mezclas con 19% de plástico.
- 4.El agregado de perlita cruda en remplazo de una parte de cemento tuvo un buen comportamiento, ya que las mezclas con este mineral tuvieron la resistencia a la compresión exigida por la Norma y también acompañó a la reducción de la densidad del hormigón.
- 5.Se recomienda la sustitución de agregado grueso por agregado Plástico y de Perlita cruda al 19% de la mezcla de hormigón, para la realización de Bloques, ladrillos y contrapisos de hormigones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al GIMCO, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta, al Ingeniero Lucas Burgos y al Técnico Oscar Recalde, también se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y al Consejo de Investigación de la UNSa por el financiamiento de este trabajo de investigación. Por ultimo agradecer al investigador Ricardo Echazú del INENCO y a la alumna Karen Díaz por su participación.

REFERENCIAS

- Akçaözöğlü, S., C.D. Atiş, and K. Akçaözöğlü, An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste management*, 2010. 30(2): p. 285-290.
- Albano C, N. Camacho, M. Hernandez, A. Mathreus, A. Gutierrez, Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behaviour at different w/c ratios, *Waste Manage. (Oxford)* 29 (2009) 2707–2716.

- Albano, C., et al., Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 2009. 29(10): p. 2707-2716.
- Aramayo A., Burgos L., Fernández M., 2016, Proyecto final de Ingeniería Civil, “Estudio de finos de perlita en la fabricación de ladrillos para su uso en viviendas sociales”, Universidad Nacional de Salta.
- Bárbara Belén Raggiotti, 2015, Tesis de doctorado en ingeniería – mención materiales, Hormigones con adiciones activas: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad, Universidad tecnológica nacional facultad regional córdoba.
- Chaudhary, M., V. Srivastava, and V. Agarwal, Effect of waste low density polyethylene on mechanical properties of concrete. *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)* Volume, 2014. 3: p. 123-126.
- Choi, Y.-W., et al., Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35(4): p. 776- 781.
- Instituto de Cemento Portland Argentino, “Diseño racional de mezclas de hormigón”, 2018”, <http://www.icpa.org.ar/>
- Ismail Z., E. Al-Hashmi, Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Manage. (Oxford)* 28 (2008) 1041–2047.
- Kan, A. and R. Demirboğa, A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of materials processing technology*, 2009. 209(6): p. 2994-3000.
- Kou, S., et al., Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, 2009. 29(2): p. 621-628.
- Marzouk, O.Y., R. Dheilily, and M. Queneudec, Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste management*, 2007. 27(2): p. 310-318.
- Naik, T.R., et al., Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. *Cement and concrete research*, 1996. 26(10): p. 1489- 1492.
- Saikia N., J. de Brito, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 236–244.
- Saikia N., J. de Brito, Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review, *Constr. Build. Mater.* 34 (2012) 385–401.
- Sánchez Soloaga Iris Belén, 2015, Doctorado en Ingeniería, Mención Civil Ambiental, Envoltantes de hormigón liviano sustentable: diseño y propiedades para el ahorro energético, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza.
- Sharma H., P.P. Bansal, Use of different forms of waste plastic in concrete – a review, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 473–482.
- Tang, W., Y. Lo, and A. Nadeem, Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2008. 30(5): p. 403-409.

TEST DOSAGES FOR BLOCKS, BRICKS AND CONCRETE SUBFLOORS WITH WASTE PLASTICS AND FINES PERLITAS

ABSTRACT

Salta Capital 58 daily tons of plastic are thrown, recover only 5 tons daily. Which they are recycled by three cooperatives and a provincial program. In the production of expanded perlite 20% of the crude perlite are wasted in boilers. It is proposed as a solution the development of concrete mixtures for the manufacture of bricks, blocks and subfloors with aggregates of High and Low Density Polyethylene and Fine Perlite. The coarse and fine aggregates were replaced in various percentages of volume of mixture by the recycled plastics. Crude Perlite was used to replace a part of the cement. Seven test tubes were developed for each dosage under IRAM Standards for the mechanical test corresponding to 7 and 28 days of curing. The density of the low concrete with the addition of plastic and perlite. Dosages with 19% plastic aggregate exceeded the minimum required for compressive strength.

KEYWORDS: Dosages of concrete, bricks and blocks, High and Low Density Polyethylene, Perlite, Recycling.

RECICLADO EDIFICIO DE UNA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL EN BERISSO, BUENOS AIRES, ARGENTINA

Viegas, G¹.; Chévez, P¹.; Garganta, M. L.²; Jodra, J.I.¹.; Díscoli, C.¹;

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC). Grupo asociado INENCO.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

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, chevezpedro@gmail.com,

laugarganta@gmail.com, discoli@rocketmail.com, juanjodra@gmail.com

Recibido 15/08/18, aceptado 28/09/18

RESUMEN: El presente trabajo tiene por objetivo analizar estrategias de reciclado edilicio para el Gran La Plata, seleccionar las más adecuadas y aplicarlas in situ en una vivienda de interés social localizada en la ciudad de Berisso, con alto nivel de replicabilidad. La metodología se desarrolla en dos etapas: i. el análisis de estrategias de reciclado mediante un estudio tipológico y constructivo, la elaboración de catálogos y adecuación a nivel B de la norma Iram 11605; ii. la aplicación in situ de un reciclado edilicio, mediante la selección de una tipología representativa, la evaluación de alternativas y costos, y la realización de una auditoria térmico-energética previa y posterior a la aplicación de mejoras. Los resultados muestran la factibilidad de las estrategias en obra, así como una reducción sustancial de la amplitud térmica interior tanto en invierno como en verano, y una reducción del consumo de energía en invierno.

Palabras clave: reciclado edilicio, auditoria energético-ambiental, vivienda social.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo energético edilicio residencial, a nivel internacional, tiene un peso muy significativo dentro de la demanda total de energía con valores del orden del 23% (IEA, 2015). Es por ello que los países que han afrontado medidas concretas para lograr reducciones en su demanda energética focalizaron en el mejoramiento de las condiciones termo-energéticas de las futuras construcciones, pero también de las viviendas existentes, las cuales son mayoritarias en el parque edilicio.

El lanzamiento de estas medidas tuvo su auge luego de la primer crisis petrolera de 1973, donde los países energo-intensivos necesitaron replantear las formas de uso y la eficiencia energética en todos los sectores involucrados. En el sector edilicio residencial, los países desarrollados han introducido con éxito medidas y principios relacionados con el uso racional, la conservación y la eficiencia de los usos finales. Dichos países trabajaron, en primera instancia, en el análisis y desarrollo de medidas de rehabilitación progresiva en el parque edilicio existente y, durante el proceso de reciclado del parque existente, se sentaron las bases normativas para la edificación nueva. Las mejoras energéticas en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) generaron que la demanda creciera solamente el 4% entre 1973-1985, mientras que el PBI creció en el mismo período el 30% (Rosenfeld et al., 1993). Países como España, a través del IDAE (IDAE, 1986), y Francia, por medio del ADEME (ADEME, 1986) y el COSTIC, llevaron a cabo la organización e implementación del reciclado sistemático de gran parte de la edificación a nivel nacional. Se realizaron numerosas publicaciones orientadas a la difusión, a la capacitación y al desarrollo científico-académico. Al igual que los ejemplos mencionados, el resto de los países desarrollados en su conjunto actuaron en consonancia entendiendo que no es necesario mencionar las singularidades de cada proceso.

¹ Investigadores y Becarios de CONICET

² Docente-investigador FAU-UNLP.

Con el tiempo, en gran parte de los países europeos, las medidas y los principios de Passive House Retrofit (PHR) se han ido introduciendo con éxito en la rehabilitación del parque edificatorio existente, permitiendo minimizar los efectos de las crisis energéticas de las últimas tres décadas. Actualmente los ahorros de energía alcanzados en dichos países pueden variar en un rango del 80-95% dependiendo de las tipologías (Verbeeck et al., 2005; Rodríguez González et al., 2011).

Paralelamente en la región Latinoamericana, los efectos de las crisis petroleras generaron acciones similares con escenarios político-institucionales diferentes. En el caso de Argentina, en la década del ochenta se comenzaron a impulsar políticas estatales destinadas al uso racional de la energía, como por ejemplo el Programa Integral de Conservación-URE para la Argentina (Decreto 2247/85), el cual planteaba alcanzar un ahorro de energía del 10% para 1989 y destinaba presupuesto para su ejecución. Las acciones propuestas contemplaban: incentivos directos a los usuarios, la promoción de códigos de edificación orientados a la conservación de la energía, acciones orientadas al mejoramiento de los equipos domiciliarios, la realización de estudios destinados a identificar los patrones de consumo energético, entre otras iniciativas (Infoleg, 2017). Si bien el programa fue discontinuado rápidamente, en lo que refiere a la última iniciativa, el programa AUDIBAIRES, desarrollado en la década del '80 por el Instituto de Arquitectura Solar de la Prov. de Buenos Aires, elaboró una metodología, para ese entonces inédita, que tenía como objetivo evaluar en forma masiva el parque edilicio a través de auditorías energéticas globales y detalladas (IAS-FABA, 1983). En los '90, con el programa URE-AM se profundizó sobre el potencial de uso racional de la energía –URE- (Rosenfeld et al., 2002), en el Área Metropolitana de la ciudad de Buenos Aires y en el Gran La Plata.

Si bien hubo avances significativos en relación a estudios sobre el uso racional de la energía, hasta mediados de la década del 2000 las políticas concretas orientadas a esta temática no fueron incluidas en la agenda política nacional. Con la salida de la crisis político-social de 2001, y ante una situación coyuntural de incremento en la demanda y declive en la producción de energía primaria (Chévez, 2017), fue necesario impulsar acciones que permitieran afrontar la inminente pérdida del autoabastecimiento energético. Es por ello que, entre diversas acciones, se lanzó el Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía –PRONUREE- (Decreto 140/2007) que propuso una serie de lineamientos sobre los distintos sectores de consumo. En cuanto al sector residencial, este contemplaba aspectos constructivos tanto de viviendas nuevas como existentes y abordaba el mejoramiento del equipamiento domiciliario. Focalizando en las “viviendas en uso”, el PRONUREE planteaba desarrollar incentivos, como por ejemplo el financiamiento preferencial para medidas destinadas a reducir el consumo; diseñar una estrategia para la implementación masiva de sistemas de calentamiento de agua basados en energía solar; e implementar un programa nacional de aislamiento de viviendas que incluyera techos, envolventes y aberturas (Infoleg, 2018). Sin embargo, los resultados obtenidos sobre el parque edilicio existente indican que lo previsto para las viviendas en uso no ha avanzado de la forma esperada.

En cuanto al estado del arte sobre la temática del reciclado edilicio, a nivel internacional es posible identificar diversos trabajos científicos dedicados al análisis del comportamiento previo y posterior de viviendas existentes sometidas a reciclados de su envolvente. Algunos ejemplos son: el estudio de Baeli (2013), que recopila los resultados de veinte reciclados energéticos en el Reino Unido; el trabajo de Calderón y Rodríguez Beltrán (2018), que presenta un estudio empírico de dos años de duración sobre los efectos del aislamiento de muros en un edificio de viviendas sociales de gran altura en Newcastle; en Liang et al. (2017) se analiza el impacto del Programa Energize en Phoenix, utilizando datos de facturación previos y posteriores a las mejoras energéticas en más de 800 edificios; o el trabajo de Ignjatović et al. (2016), en el que se analiza un caso de estudio en la ciudad de Belgrado; entre otros ejemplos.

Por su parte, ante la escasa difusión de emprendimientos de reciclados energéticos a nivel nacional, es de destacar que los estudios referidos a esta temática son escasos. Algunos ejemplos son: el trabajo de Rodríguez et al. (2017), donde se plantea una metodología teórica para el abordaje del parque residencial de la ciudad de La Plata; el trabajo de Andersen et al. (2017), donde se analizan viviendas sociales en estado base para la propuesta de medidas de RETROFIT en clima frío; o el trabajo de

Diulio et al. (2016), donde se estudia el impacto luego de realizarse un reciclado sobre una vivienda particular de la ciudad de La Plata.

En este contexto, se trabajó en un proyecto de investigación plurianual financiado por CONICET (PIP CONICET 097) denominado “Desarrollo de tecnologías y pautas para el reciclado masivo de la envolvente edilicia residencial orientado al uso racional y eficiente de la energía en áreas urbanas” (Discoli, 2012), dentro del cual se planteó entre sus objetivos evaluar las alternativas constructivas y elaborar catálogos tecnológicos tendientes a sistematizar y normalizar el potencial de ahorro energético a nivel edilicio, a efectos de ser replicado en forma masiva; así como también ensayar e implementar algunas alternativas constructivas relevantes en laboratorio e in situ a efectos de evaluar sus comportamientos.

En base al contexto descrito y en el marco del mencionado proyecto CONICET se plantea el presente trabajo que tiene por objetivo analizar las posibles estrategias de reciclado existentes para el área de estudio, el Gran La Plata, seleccionar las más adecuadas y aplicar las estrategias in situ para evaluar el proceso de la obra y el comportamiento previo y posterior de la vivienda con la aplicación de medidas. Se tomó como caso de estudio una vivienda de construcción estatal para realizar los primeros ensayos. Dicha tipología de vivienda representa un alto nivel de replicabilidad, puesto que éstas tienen un peso considerable dentro del parque total de viviendas. El presente análisis permitirá evaluar las potencialidades de las medidas de mejoramiento para ser aplicadas en forma masiva.

2. METODOLOGÍA

En principio se plantean las estrategias de reciclado edilicio en el Gran La Plata con sus respectivas metodologías de análisis y en segunda instancia se aplican in situ las estrategias de reciclado edilicio y su evaluación del comportamiento térmico-energético. A continuación se desarrolla la instrumentación para cada etapa.

2.1. Estrategias de reciclado edilicio en el Gran La Plata

Como primera instancia se desarrolla un análisis del parque edilicio residencial del Gran La Plata desde aspectos tipológicos, sistemas constructivos y componentes con el objeto de evaluar posibles propuestas de reciclado masivo del conjunto edilicio. Se trabaja a partir de estudiar y definir la representatividad tipológica de las unidades edilicias residenciales, teniendo en cuenta en la clasificación aspectos funcionales, morfológicos, constructivos, histórico-temporales y modalidad de gestión (Rosenfeld et al., 1988).

En cuanto a su tecnología y componentes, se trabaja a nivel de *muros, cubierta y aberturas*, definiendo especificidades para cada caso (Rodríguez, et al., 2017). Se han analizado las situaciones iniciales o “de base” y luego se desarrollan propuestas de mejoramiento tecnológico-constructivo en sus características termo-energéticas. La selección de los distintos casos de mejoramiento es motivada por sus características según dos criterios principales: a. Simpleza y eficiencia en la concreción del reciclado: se refiere al criterio de su sencilla adaptación tecnológico-constructiva potenciada desde sus características de pureza formal y simplicidad en el lenguaje, lo cual facilita la ejecución y las técnicas requeridas para su reciclado. De esta manera se priorizan las propuestas de mejoramiento tecnológico-constructivo con aislación exterior, manteniendo la esencia del lenguaje original y obteniéndose mayores beneficios en términos de aislación, inercia térmica y reducción de riesgo de condensación; b. Conservación del lenguaje arquitectónico original: en referencia al criterio de conservación de sus fachadas exteriores, por reconocerse en las unidades edilicias de análisis lenguajes arquitectónicos de importante valor estético, simbólico y patrimonial que se desea preservar. En lo que también se pueden incluir aquellas unidades con materialidades complejas que dificulten sustantivamente la aplicación de reciclados desde la cara exterior. Por lo tanto se priorizan las propuestas de mejoramiento tecnológico-constructivo de aislación interior, en función de conservar el lenguaje exterior.

A su vez se menciona que los distintos espesores de aislación son determinados según los valores máximos del índice de eficiencia energético-económico (IE), herramienta desarrollada a tal fin

(Rodríguez et al., 2012); debiendo cumplir como mínimo con los valores máximos admisibles de transmitancia térmica en nivel B Norma IRAM N°11605 (1996), en concordancia con los requerimientos según Ley 13059 de la Provincia de Buenos Aires.

2.2. Aplicación in situ de las estrategias de reciclado edilicio

De acuerdo a la clasificación tipológica de la etapa anterior, se selecciona una vivienda representativa, específicamente una vivienda de gestión estatal, de producción masiva y amplia existencia en el caso de estudio. Se realiza un relevamiento exhaustivo de la vivienda, conociendo pormenorizadamente las características constructivas e higro-térmicas de su envolvente y desarrollando un relevamiento de usos por parte del usuario. En base a esta caracterización, y utilizando el catálogo previamente desarrollado, se seleccionan las mejoras a aplicar, se evalúan costos y se procede a la ejecución del mejoramiento. Las medidas se adaptan a las condiciones económicas y de factibilidad comercial de los elementos aislantes a incorporar. Se documentan todas las etapas de la aplicación de las mejoras fotográficamente. Los costos son afrontados entre la propietaria y el proyecto de investigación que da marco a este trabajo. Para la ejecución de los trabajos de obra, fue necesario capacitar a la mano de obra sobre aspectos específicos a tener en cuenta.

Para evaluar los efectos del reciclado se realiza una comparación de la situación de base de la vivienda (sin mejoras) con la situación mejorada, realizando una auditoría térmico-energética de la misma. Se realizó una auditoría en el invierno (junio y julio) del 2015 y el verano (enero y febrero) del 2016 cuando la vivienda aún no había sido reciclada. Entre mayo y junio del 2016 se realizan las mejoras y durante julio y agosto de 2016 y enero y febrero de 2017 se repite la auditoría de la vivienda en condiciones invernales y estivales. La auditoría se basó en el registro de: temperatura (°C), humedad relativa (%), iluminación natural (lux) y radiación solar (W/m^2) cada 15 minutos utilizando adquirentes de datos electrónicos no invasivos (Hobo) y un solarímetro asociado a un Hobo. Se colocó un sensor en cada ambiente de la vivienda y en el exterior. Por otro lado se recopilaban los datos horarios de temperatura, humedad y radiación solar de la estación meteorológica Observatorio Astronómico de La Plata (OALP) para los meses y años de la auditoría, para comparar las distintas situaciones climáticas encontradas. Por otro lado se realizaron los registros de los medidores de energía eléctrica y gas natural de distintos días por parte de la usuaria. Y para el período invernal del 2016, con la vivienda ya reciclada, se le solicitó a la usuaria que realizara un uso específico de la vivienda (incorporando o no energía auxiliar; registrando días nublados y soleados; registrando ocupación o no de la vivienda) para conocer la respuesta de la vivienda reciclada bajo diferentes situaciones.

3. RESULTADOS

3.1. Estrategias de reciclado edilicio en el Gran La Plata

De acuerdo a lo establecido por Rodríguez, Discoli y Martini (2017), quienes proponen una metodología para el reciclado edilicio residencial en forma masiva, las tipologías morfológico-tecnológicas más representativas para el caso de la Región del Gran La Plata, son las siguientes siete: *la casa chorizo; la casa de renta; el chalet californiano; la casa racionalista; la casa cajón* (de iniciativa privada o estatal); *el bloque bajo o monoblock y el edificio PH en altura*.

Posteriormente, para abordar las estrategias concretas de reciclado edilicio, el trabajo mencionado planteó la desagregación en unidades menores, proponiendo el desglose de los componentes de las distintas envolventes edilicias. En consecuencia, se distinguen distintas variantes de *muros; cubiertas; aberturas y encuentros*. Las Tablas 1, 2 y 3 presentan las estrategias de reciclado para los elementos *muros, cubiertas y aberturas*; con sus valores de K en estado base y con diversas estrategias de mejoramiento para alcanzar el nivel B de la Norma IRAM 11605 (1996).

MUROS			
	Ladrillo hueco no portante, revocado ambas caras (0.22m) K= 1,605 W/m² °C	Ladrillo común revocado en ambas caras (0.20m) K= 2,370 W/m² °C	Ladrillo común con interior revocado y exterior visto (0.28m) K= 2,125 W/m² °C
	(5cm de EPS) K= 0,485 W/m² °C	(5cm de EPS) K= 0,537 W/m² °C	X
	(5cm de EPS) K= 0,484 W/m² °C	(5cm de EPS) K= 0,536 W/m² °C	X
	(7.5cm de LV) K= 0,396 W/m² °C	(7.5cm de LV) K= 0,430 W/m² °C	(7.5cm de LV) K= 0,421 W/m² °C

Tabla 1: Muros usuales en el caso de estudio y posibles estrategias de reciclado del elemento (fuente: Rodriguez et al. 2017).

CUBIERTAS				
	Chapa galvanizada, con cielorraso suspendido K (inv.)= 2,606 K (ver.)= 1,906	Teja francesa, con cielorraso de machimbre visto K (inv.)= 4,283 K (ver.)= 3,295	Losas hormigón armado y cielorraso aplicado K (inv.)= 2,965 K (ver.)= 2,455	Losas con vigueta y ladrillo sapo cerámico K (inv.)= 1,744 K (ver.)= 1,554
	(6cm de EPS) K (inv.)= 0,477 K (ver.)= 0,447	(7cm de EPS) K (inv.)= 0,448 K (ver.)= 0,434	X	X
	(6cm de EPS) K (inv.)= 0,462 K (ver.)= 0,434	X	X	X
	X	X	(6cm de EPS) K (inv.)= 0,475 K (ver.)= 0,460	(6cm de EPS) K (inv.)= 0,489 K (ver.)= 0,473
(7,5cm de LV) K (inv.)= 0,438 K (ver.)= 0,413	(7,5cm de LV) K (inv.)= 0,469 K (ver.)= 0,454	(7.5cm de LV) K (inv.)= 0,447 K (ver.)= 0,434	(10cm de LV) K (inv.)= 0,323 K (ver.)= 0,316	

Tabla 2: Cubiertas usuales en el caso de estudio y posibles estrategias de reciclado del elemento (fuente: Rodriguez et al. 2017).

ABERTURAS	
	Vidrio simple de 4mm / K= 5,817 W/m² °C
	(madera 0,5cm) / K= 2,780 W/m² °C
	(madera 1cm) / K= 2,648 W/m² °C
	(cámara de aire 5-10cm) / K= 2,909 W/m² °C

Tabla 3: Aberturas usuales en el caso de estudio y posibles estrategias de reciclado (fuente: Rodriguez et al. 2017).

El catálogo desarrollado permite observar diferentes tecnologías posibles de aplicar. Las mismas se encuentran sujetas a las condicionantes del mercado y económicas del usuario. Se plantea entonces la necesidad de seleccionar las más efectivas de acuerdo al caso de aplicación.

3.2. Aplicación in situ de las estrategias de reciclado edilicio

Para verificar el comportamiento real de la aplicación de pautas de reciclado edilicio en una vivienda existente, se llevó a cabo el mejoramiento de la envolvente de una vivienda de construcción estatal, la cual dentro de la clasificación de Rodriguez et al. (2017) puede ser considerada como la tipología de

“casa cajón”. En este caso en dúplex, con unidades apareadas en hilera, considerada como de alto nivel de representatividad que cuenta con características que simplifican la ejecución de intervenciones.

La vivienda se localiza en la calle 160 entre 21 y 22 (Figura 1 y 2), la cual fue construida mediante el “Programa Federal de Viviendas” entre los años 2010-2011 por el Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires (IVBA). Se trata de un dúplex de 48m², cuya planimetría se expone en la Figura 3. Las características constructivas obtenidas de la memoria técnica se pueden sintetizar de la siguiente manera: los muros exteriores son de ladrillo cerámico hueco de 18cm x 18cm x 33cm, revocado en ambas caras; posee una cubierta con pendiente, construida en chapa galvanizada N°24, con aislamiento hidrófugo y térmico de alta densidad de 4cm de espesor (inexistente en la obra auditada); asimismo presenta un pequeño sector con cubierta plana, construida con losetas pretensadas, con aislamiento hidrófugo y térmico mínimo (inexistente en la obra auditada). Por su parte, a los efectos de contar con una caracterización sintética de la vivienda, la Tabla 4 expone una serie de indicadores dimensionales, morfológicos y energéticos que son determinantes para los aspectos térmicos de la misma.



Figura 1: Implantación de la vivienda reciclada. Figura 2: Frente de la vivienda reciclada.

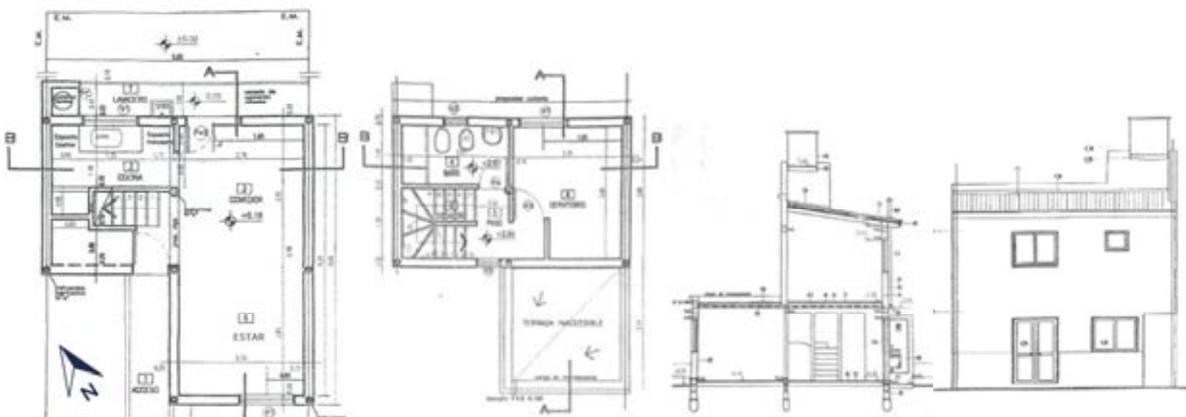


Figura 3: Plantas cortes y vistas de la vivienda.

Perímetro PB (m)	Perímetro PA (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Envolvente (m ²)	Envolvente expuesta (m ²)	IC-Índice de compactación (%)	FE- Factor de exposición	FF-Factor de Forma	Transmitancia térmica K muros (W/m ² °C)	Transmitancia térmica K techo inclinado (W/m ² °C)		Transmitancia térmica K techo plano (W/m ² °C)		Coeficiente global de pérdidas G (W/°C m ³)
										Inv.	Ver.	Inv.	Ver.	
25,0	18,9	48	162,7	203,6	121,5	70,8	0,59	1,2	1,60	4,68	3,52	2,96	2,45	2,8

Tabla 4: Indicadores dimensionales, morfológicos y energéticos. Referencias: IC (Perímetro de planta/perímetro de circunferencia); FE (envolvente expuesta/envolvente total); FF (Superficie de envolvente/volumen).

En función de la tipología de vivienda y la metodología teórica desarrollada por Rodríguez et al. (2017), se seleccionaron las pautas más adecuadas para el caso de estudio (Tablas 1 y 2).

Es por ello que en el caso de los muros (Figura 4) se implementó la estrategia de aislación exterior en la cual se fijan a la pared existente placas de poliestireno expandido de 30 mm (EPS de 20 kg/m^3) por medio de adhesivo (o fijaciones mecánicas), luego se aplica una capa de *base coat* (mezcla de polímeros acrílicos y cemento Portland), para obtener resistencia mecánica se refuerza dicha capa con una malla de fibra de vidrio que cubre toda la superficie del EPS, la terminación del muro se realizó con un revestimiento texturado. Este sistema constructivo se denomina *Exterior Insulation Finished System* (EIFS) y cuenta con la ventaja de que permite mejorar las prestaciones de la envolvente interviniendo desde el exterior, minimizando las molestias para el usuario, además elimina los puentes térmicos e incorpora la masa térmica al balance energético de la vivienda.

Para la cubierta de chapa (Fig. 5 izq.) se ejecutó un cielorraso suspendido de placas macizas de roca de yeso de 9,5 mm de espesor, con perfilaría de chapa galvanizada y aislación térmica de lana de vidrio de 80 mm. Esta opción evita la necesidad de desmontar los techos y, además, al descender la altura útil de las habitaciones, se reduce el volumen a climatizar. Por su parte, para la cubierta plana de hormigón (Fig 5 der.), se utilizó una aislación térmica exterior con EPS de 75 mm de alta densidad (20 kg/m^3), separado de la losa unos 10 mm para permitir el escurrimiento de agua ante eventuales filtraciones, con una protección superior ejecutada con malla geotextil sintético que ofrece protección mecánica y evita desarrollo de vegetación, mientras que la terminación es de piedra partida gris tamaño medio.



Figura 4: imágenes de la ejecución de la obra de aislación exterior de muros.



Figura 5: ejecución del cielorraso suspendido (izq.) y de la aislación térmica de la losa (der.)

Por último, ante la imposibilidad de afrontar los costos del recambio total de carpinterías, se optó por mejorar las prestaciones térmicas de las ventanas durante el período de mediciones por medio de la simulación de un doble aventanamiento para evitar infiltraciones incorporando un film transparente de polietileno de larga duración térmica (LTD) coextruido, tricapa, de tonalidad blanco traslúcido, de 100 micrones de espesor. Asimismo se colocaron burletes en todas las aberturas de hoja.

La totalidad de la obra resultó en un costo de AR\$60.728. Dicho monto significó un valor de 3995 USD (tipo de cambio 15,20 ARS/USD mayo 2016), por lo que se obtiene un costo unitario de 83,2 USD/m² de planta (48 m² totales), representando un 49% los materiales y un 51% la mano de obra.

3.3. Auditoría térmica energética de la vivienda antes y después de las mejoras.

3.3.1. Análisis climático de ambos períodos

A partir de la información climática proporcionada por la FCAyG-UNLP se pudo verificar que los inviernos del 2015 y del 2016 presentan similares características generales. Las temperaturas media, máxima y mínima del 2015 fueron 11,7, 23,7 y 0,7°C respectivamente. El invierno del 2016 mostró

temperaturas medias, máximas y mínimas de 9.7, 17.7 y 1.3°C respectivamente. Se observa entonces que el año 2016 fue levemente más frío que el 2015. En el caso del verano se observan similitudes en los diferentes segmentos registrados. Se observa que en 2016 las temperaturas son mayores al inicio del mes de febrero respecto del 2017 y menores al final de febrero de 2016 respecto del 2017. Estos resultados nos permiten desarrollar el análisis comparado.

3.3.2. Comportamiento invernal de la vivienda

La vivienda en dúplex posee gran compacidad y bajo factor de exposición al exterior ya que comparte dos medianeras con sus vecinos. Los ambientes principales, comedor, cocina y dormitorio están expuestos a la mejor orientación (noreste). La Figura 6 muestra el comportamiento de los principales locales de la vivienda antes de realizarse las mejoras y el gráfico de confort de invierno. Durante el período la usuaria incorporó energía con un calefactor tiro balanceado de 5000 kcal/h (promedio 6hs al máximo por día en el comedor) y un calentador eléctrico de 425 W (entre 6 y 12 hs diarias de uso en el dormitorio). La Figura 7 muestra el comportamiento de la vivienda en el invierno luego de incorporarse mejoras en su envolvente y el gráfico de confort de invierno. Se han indicado los momentos en los que se han incorporado las mejoras tecnológicas, los cuales se realizaron en tres etapas. En el primer tramo, del 30-06 al 21-07 se realizó la medición de la vivienda con las mejoras de cielorraso suspendido y aislamiento de muros. El 21-07 se incorporó aislamiento de ventanas (simulando doble vidrio). El 03-08 se aisló la losa externamente con poliestireno expandido.

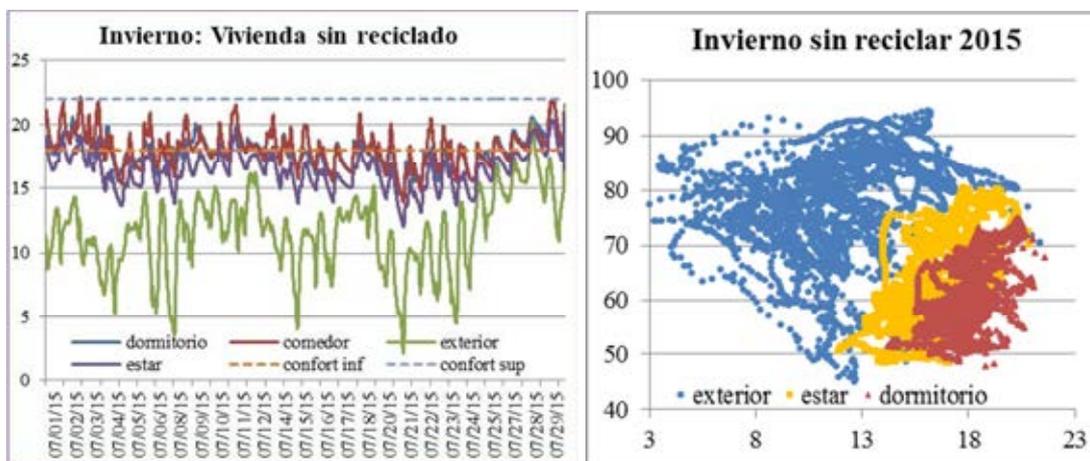


Figura 6: comportamiento térmico y diagrama de confort de la vivienda sin reciclar (invierno).



Figura 7: comportamiento térmico y diagrama de confort de la vivienda reciclada (invierno).

Bajo estas condiciones podemos observar que antes del reciclado (Fig. 6) la vivienda permanece en un nivel térmico entre los 15 y los 23°C de temperatura en sus ambientes. En general los ambientes responden de manera similar, a excepción del estar. Este último, si bien está integrado al comedor (el cual tiene orientación noreste), su orientación es S-O, registrando las temperaturas más bajas dado que no recibe significativamente la influencia de la radiación solar. Por otro lado, el comportamiento general de la vivienda muestra que aun siendo de gran compacidad, las oscilaciones térmicas de los ambientes son pronunciadas. Las mismas son de 8°C aproximadamente. Su variación concordante con

la variación térmica exterior confirma la baja calidad térmica de su envolvente. Gran porcentaje de los días los locales se encuentran por debajo de los 18°C, sobre todo por las noches, a pesar de haber incorporado energía auxiliar para calefaccionar.

La Figura 7 muestra la evolución térmica en función de cada intervención mencionada, observando la influencia de sus niveles térmicos a partir de la mejora sustantiva de su envolvente y la recuperación de su inercia térmica. Las diferencias de temperaturas entre las mínimas y las máximas se reducen y oscilan en los 3°C, mientras que en el período anterior sin mejoras la amplitud térmica era de 8°C. La incorporación de todas las medidas de eficiencia previstas permitieron registrar temperaturas dentro del rango de confort térmico (mes de agosto). Así también en el invierno previo a las mejoras, se incorporó energía auxiliar para mejorar las condiciones térmicas en los días más críticos.

En esta instancia se puede observar que el comportamiento general de la vivienda es significativamente más estable y homogéneo dado que no presenta grandes variaciones entre locales. En el caso del estar, que es el local con la orientación menos beneficiosa, si bien mantiene diferencias térmicas con el resto de los locales, mejora significativamente en la última etapa de medición. El aislamiento de la cubierta de losa y de la ventana S-O redujo sustantivamente las pérdidas por envolvente e incorporó su masa térmica al balance general. A nivel general se observa una buena respuesta de la medida de mejoramiento adoptada ya que permitió aislar térmicamente la vivienda e incorporar toda la masa térmica interior estabilizando la vivienda, con temperaturas más homogéneas.

Los diagramas de confort de ambos períodos medidos en los locales de dormitorio y estar. Los gráficos muestran que el comportamiento térmico externo previo a las intervenciones y posterior a las mismas, fue similar en ambos años. Bajo estas condiciones similares se puede observar que los ambientes alcanzan los mismos niveles de confort (dormitorio y estar) con menor consumo de energía para climatizar. El ambiente del dormitorio, que recibe mayor radiación solar, muestra mejor respuesta en 2016 ya que acumula la energía recibida.

Por su parte, la Figura 8 muestra que a pesar de que el invierno de 2016 fue más riguroso que el de 2015, las condiciones de temperatura interior en los locales son similares ambos años. Sin embargo, la principal diferencia radica en que los consumos de energía fueron un 30% menor en 2016. Se entiende que los valores detectados responden a las condiciones de confort del usuario, quien incorpora energía auxiliar a los espacios y por ese motivo en ambos períodos los valores son semejantes.

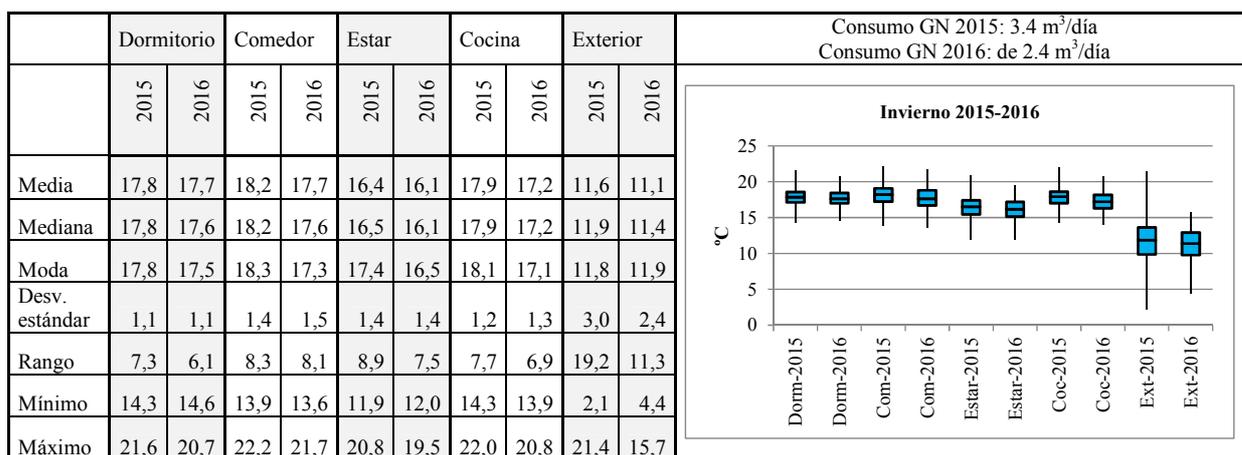


Figura 8: Análisis de estadística descriptiva y diagrama de caja y bigotes de las temperaturas para el período 1 al 30 de julio de 2015 y 2016.

A los efectos de visualizar con mayor detalle los niveles térmicos alcanzados en la vivienda en la situación base (sin mejoras) y con las intervenciones de reciclado se detallan los registros horarios de diferentes días y distintas situaciones de utilización. La Figura 10 muestra las condiciones térmicas particulares de los ambientes en: un día soleado (23.06.2015) antes del mejoramiento, e incorporando energía auxiliar; un día nublado (29.08.16) sin calefacción ni ocupación luego de las mejoras de la envolvente; un día soleado (06.08.16) sin calefacción, con ocupación y reciclado completo.

La Figura 10 (izquierda) muestra un día soleado de invierno del año 2015 sin mejoras en la envolvente. En la misma se observa una relación directa entre la temperatura exterior y la de los ambientes, sin lograr alcanzar al nivel mínimo de confort, utilizando calefacción. La Figura 10 (centro) muestra que, luego de las mejoras, sin aportes térmicos los espacios se mantuvieron muy estables en una temperatura de 18°C gracias a la calidad térmica de la envolvente y la inclusión de la inercia térmica. Asimismo se ve que en condiciones externas similares pero incorporando energía solar y ocupación del espacio, la temperatura aumenta, mejorando el nivel de confort térmico.



Figura 10: situaciones particulares de uso de la vivienda previo y posterior a la mejora.

3.3.3. Comportamiento estival de la vivienda

La Figura 11 muestra el comportamiento en el mes de febrero sin reciclado y su diagrama de confort. La Figura 12 muestra el comportamiento en el mes de febrero con reciclado y su diagrama de confort.

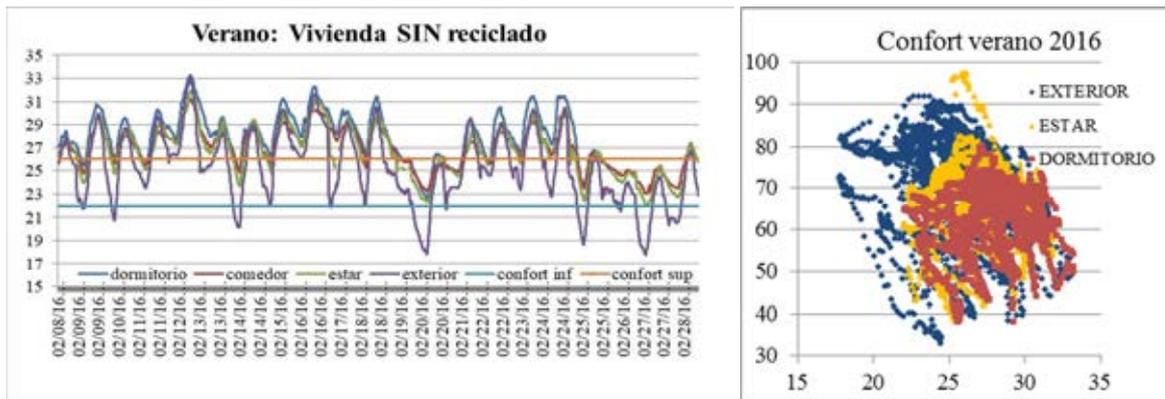


Figura 11: Comportamiento térmico y diagrama de confort de la vivienda sin reciclar (verano).

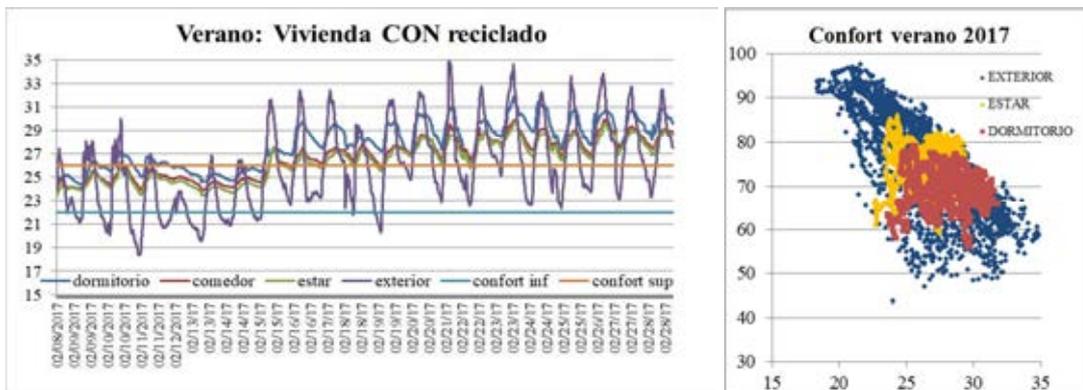


Figura 12: Comportamiento térmico y diagrama de confort de la vivienda reciclada (verano).

Se observa que el comportamiento de la vivienda sin aislamiento en verano, observándose que las temperaturas de los locales acompañan las temperaturas exteriores. Con lo cual la vivienda muestra una gran ineficiencia en su envolvente, registrando temperaturas máximas en sus ambientes que superaron los 30°C. Por otro lado, una vez incorporadas las medidas de mejoramiento en la

envolvente, la vivienda reduce significativamente sus amplitudes térmicas obteniendo un comportamiento térmico más estable. Si bien las temperaturas mínimas no bajan por las noches debido a la falta de ventilación natural por parte de la usuaria, las temperaturas máximas son menores a las exteriores. La estabilidad lograda en los ambientes estar/comedor se advierte en que las temperaturas interiores no acompañan a las exteriores como en la situación base (sin mejoras de envolvente). Como excepción se puede verificar en el dormitorio temperaturas que superan los 29°C en contadas oportunidades en aquellas situaciones que no se protegió con los postigos el ingreso de sol.

Con respecto a los gráficos de confort para ambas situaciones, se visualiza que el exterior presentó condiciones térmicas entre 18 y 32°C en 2016 y entre 18 y 35°C en 2017 durante los períodos auditados. Las condiciones de humedad fueron similares. A partir de estas condiciones, se observa que los ambientes respondieron de manera más estable en período 2017 (temperaturas interiores entre 23 y 30°C aproximadamente) respecto al 2016 (temperaturas interiores entre 22 y 33°C).

La Figura 13 muestra los rangos térmicos registrados en cada caso y los consumos de energía eléctrica y gas natural (situación base sin intervención y con mejoras). Allí se verifica que ante condiciones externas similares entre el verano de 2016 y 2017 (el de 2017 levemente más riguroso que el de 2016), en las mediciones posteriores a las mejoras se encontraron menores temperaturas máximas y menores temperaturas promedio en los ambientes. A su vez se obtuvieron temperaturas mínimas más altas que en el período anterior. En este caso el usuario no cuenta con equipos de refrigeración, por lo tanto el impacto del reciclado puede verse representado en un cambio del comportamiento térmico.

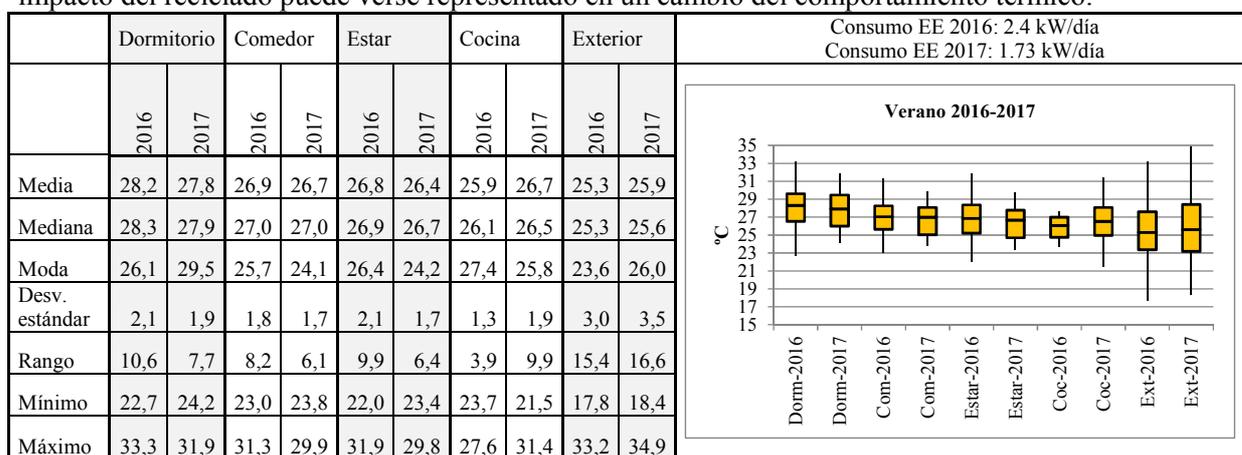


Figura 13: Análisis de estadística descriptiva y diagrama de caja y bigotes de las temperaturas del 8 al 28 de febrero de 2016 y 2017.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha desarrollado un análisis teórico general de las condiciones de la envolvente edilicia residencial del Gran La Plata, su clasificación y posterior propuesta de mejoramientos posibles de acuerdo al cumplimiento del nivel B de la Norma Iram 11605. En base a este análisis inicial, y tomando como caso de estudio una vivienda de interés social, de amplia representatividad en el caso de estudio, se decidió realizar la aplicación in situ de medidas de reciclado edilicio en la misma.

La ejecución del reciclado permitió evaluar los resultados de la implementación de las medidas seleccionadas, como así también resolver dificultades tecnológicas y de mano de obra en la vivienda. De esta manera se verificó la factibilidad de implementación y su potencialidad para el mejoramiento masivo de este tipo de conjunto de viviendas. Asimismo, se obtuvo un costo de 83 dólares por metro cuadrado de planta, siendo éste un valor de referencia para el ámbito local que puede ser de utilidad para profesionales de la construcción y potenciales usuarios.

La auditoría térmico-energética pre y post reciclado permitió verificar que los consumos de energía se redujeron, que mejoró la calidad ambiental de los espacios, y que las amplitudes térmicas interiores se redujeron significativamente. Así como también que los espacios se comportaron térmicamente homogéneos en la vivienda.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Ana Chazarreta por involucrarse en la temática y permitir que su vivienda sea reciclada para proporcionar información al proyecto. Al Dr. Arq Lucas Rodríguez por participar con información de contexto y asesorar en esta investigación. Asimismo, se agradece la información climática proporcionada por el Departamento de Sismología e Información Meteorológica de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata.

REFERENCIAS

- ADEME (1986). "Guide de diagnostic thermique". París: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- Andersen, M.; Discoli, C.; Viegas, G.; Martini, I. (2017). Monitoreo energético y estrategias de RETROFIT para viviendas sociales en clima frío. *Habitat Sustentable* (17), pp. 51-63.
- Baeli, M. (2013). *Residential Retrofit. 20 Case Studies*. Londres: RIBA Publishing.
- Calderón, C. y Rodríguez Beltrán, M. (2018). Effects of fabric retrofit insulation in a UK high-rise social housing building on temperature take-back. *Energy and Buildings* (173), pp. 470-488.
- Chávez, P. (2017). Construcción de escenarios urbano-energéticos a partir de la implementación de estrategias de eficiencia energética y energías renovables en el sector residencial. Tesis del doctorado en Ciencias [Área Energías Renovables] de la UNSa. Salta.
- Discoli, C. (2012). *Desarrollo de tecnologías y pautas para el reciclado masivo de la envolvente edilicia residencial orientado al uso racional y eficiente de la energía en áreas urbanas*. Proyecto de investigación CONICET PIP 1120110100097.
- Diulio et al. (2016). Impacto de la envolvente en la demanda de energía en calefacción residencial de la región metropolitana de La Plata, tomando como caso testigo el reciclado energético de una vivienda. *Ambiente Construido* (16), pp. 55-70.
- IAS-FABA (1983). *Programa de conservación de la energía en la vivienda. Plan piloto de evaluaciones energéticas de la zona de Capital Federal y Gran Buenos Aires. Sumario ejecutivo*. La Plata: Instituto de Arquitectura Solar.
- IDAE (1986). *Jornadas técnicas y de gestores energéticos municipales*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Dirección de Residencial y Servicios.
- IEA (2015). *Indicadores de Eficiencia Energética: bases esenciales para el establecimiento de políticas*. Paris: International Energy Agency.
- Ignjatović, N.; Ignjatović, D.; Stanković, B. (2016). Possibilities for energy rehabilitation of typical single family house in Belgrade-Case study. *Energy and Buildings* (115), pp. 154-162.
- Infoleg (2017). "Subprograma de Conservación de Energía". Decreto 2.247/85. Buenos Aires: Información legislativa y documental. Ministerio de Economía
- Infoleg (2018). "Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía". Decreto 140/2007. Buenos Aires: Información legislativa y documental. Ministerio de Economía.
- IRAM (1996). *Norma 11605. Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Liang, J., Qiu, Y., James, T., Ruddell, B., Dalrymple, M., Earl, S., Castelazo, A. (2017). Do energy retrofits work? Evidence from commercial and residential buildings in Phoenix. *Journal of Environmental Economics and Management*. En prensa.
- Rodríguez et al. (2016). Energy storage for residential dwellings. Methodology to improve energy efficiency and habitability. *Journal of Energy Storage* (8), pp. 99-110.
- Rodríguez, L.; Martini, I.; Discoli, C. (2012). Metodología para el análisis del reciclado edilicio residencial orientado a la eficiencia energética: índice de elasticidad energético-económico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (16), pp. 51-58.
- Rodríguez González, A.; Díaz, V.; Caamaño, J.; Wilby M. (2011). Towards a universal energy efficiency index for buildings. *Energy and Buildings* (43), N°4, pp.980-987.
- Rodríguez, L.; Martini, I.; Discoli, C. (2017). *Criterios y métodos para el reciclado edilicio con eficiencia energética*. La Plata: Arte Editorial Sevicop.
- Rosenfeld et al., (1993). *Mejoramiento de las Condiciones Energéticas y de Habitabilidad del Hábitat Bonaerense*. La Plata: Proyecto de investigación CONICET Expte: 03662/89; Legajo: 306590088. IDEHAB. FAU. UNLP.
- Rosenfeld et al. (1988). "Plan Piloto de Evaluaciones Energéticas de la zona Capital Federal y Gran Buenos Aires. AUDIBAIRES". La Plata: CIC y Secretaría de Energía de la Nación. Contrato SE N1 1399/83. 1985/86.
- Verbeeck, G.; Hens, H. (2005). Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable?. *Energy and Buildings* (37), N°7, pp. 747-754.

ABSTRACT: The present work aims to analyze the possible recycling strategies for the study area, the Gran La Plata, selecting the most appropriate measures and applying them in situ in an existing house. It is a "social interest housing", located in the city of Berisso, which has a high level of replicability within the total housing stock in the area. The methodology is developed in two stages: i. the analysis of recycling strategies through a typological and constructive analysis, the preparation of catalogs and adaptation to level B of the Iram 11605 standard; ii. the *in situ* application of a building recycling, through the selection of a representative typology, the evaluation of alternatives and costs, and the realization of a thermal-energy audit before and after the application of improvements. The results show the feasibility of the strategies in the construction, as well as a substantial reduction of the interior thermal amplitude both in winter and summer, and a reduction of energy consumption in winter. **Keywords:** building retrofitting, energy audit, social housing.

SECADO DE MANZANA EN SECADERO TUNEL DE LABORATORIO Y EN SECADERO SOLAR EN CONVECCIÓN NATURAL. MODELIZACION DE LA CINETICA DE SECADO

A. Iriarte y S. Bistoni

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. iriarteadolfo@gmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: En el presente trabajo se analiza el secado de manzana en secadero túnel de laboratorio con convección forzada y en un secadero solar en convección natural. Se describen los secaderos y la cinética de secado para ambos equipos, así como la evaluación térmica del secadero solar. En ambos casos el producto fue tratado previamente con jugo de limón y metabisulfito de sodio, estudiándose la influencia que ambos tienen sobre el producto final. Se utilizaron diez modelos matemáticos de secado para el ajuste de los datos experimentales. De acuerdo con los criterios estadísticos R^2 , χ^2 , MBE y RMSE, el modelo de Aghbashlo fue el que mejor describe el comportamiento de la cinética de secado de las rodajas de manzana en ambos secaderos. El tratamiento con jugo de limón resultó con mayor velocidad de secado, mejor apariencia y menor toxicidad en los dos ensayos.

Palabras clave: cinética de secado, secado convección natural, manzana, pretratamiento

INTRODUCCIÓN

El secado es el método más antiguo para conservar alimentos y también es un método ampliamente utilizado para la conservación de frutas y verduras, que funciona eliminando el agua de los alimentos, evitando así el crecimiento de microorganismos y la descomposición. El agua se elimina hasta una concentración final que asegure la estabilidad y seguridad microbiana del producto y minimice los cambios químicos y físicos del material durante el almacenamiento. En la mayoría de los procesos de secado, el agua se elimina por evaporación por el suministro de aire caliente (Lewicki y Jakubczyk, 2004). En particular, en la región del NOA es una de las formas tradicionales de obtener productos que poseen valor regional: pasas de uvas, higos, pelones, orejones de durazno, manzana, etc. En la mayoría de los casos estos productos son elaborados por pequeños productores y sus familias; son realizados en forma artesanal, exponiéndolos directamente al sol. Debido a esto, las posibilidades de contaminación son grandes y los productos no son de óptima calidad, a la vez se producen importantes pérdidas debido a factores climáticos, como ser lluvia, viento, rocío, etc. Algunos productores, con el objeto de evitar estas pérdidas, cubren el producto con plásticos o los colocan en bandejas para poder guardarlos cuando se requiere.

El comportamiento del secado es básicamente influido por factores internos (por ejemplo, densidad, permeabilidad, porosidad, características de sorción - desorción y propiedades termo físicas) y parámetros externos (temperatura, velocidad y humedad relativa del medio de secado) (Kaya et al., 2007). Por lo tanto, es muy importante definir las condiciones bajo las cuales se pueden conservar las características de los productos frescos y definir los parámetros óptimos para su almacenamiento y reutilización (Velić et al., 2004).

Los métodos de secado influyen tanto en la calidad como en las características fisicoquímicas de los productos secos (Krokida y Maroulis, 1997), siendo la apariencia, el color y otras propiedades físicas tales como contracción y porosidad las que definen la calidad del secado. En este sentido, los tratamientos previos al secado, detienen el metabolismo del tejido cortado, ya sea dañando las células

o las conexiones enzimáticas (Lewicki, 2006). También son importantes para minimizar los cambios adversos que ocurren con el contacto del aire durante el proceso de deshidratación y su posterior almacenamiento. La eficacia del pretratamiento depende del tipo de sustancia que se use.

En el caso particular de la manzana si bien se consume en gran medida como producto fresco es importante disponer de ella en épocas distintas a la de la cosecha. Una alternativa sería almacenarla como producto deshidratado y en nuestra región, debido a los altos costos de combustible o electricidad y los altos niveles de radiación solar, el empleo de secadores solares es totalmente rentable.

Existen numerosos diseños de secaderos solares adaptables al tipo de producto y al nivel de producción. Hossain y Bala (2007) proponen un secadero túnel con convección forzada; Jairaj et al. (2009) presentan una recopilación de diferentes diseños que se han utilizado para el secado; Condorí et al. (2009) presentan un secadero indirecto a nivel industrial para el secado de hortalizas con colectores solares y cámara de secado. Para el secado de pimiento para pimentón en el NOA se han propuestos varios diseños, desde semi industriales a aptos para pequeños productores: secaderos tipo invernaderos (Bistoni et al., 2008), secadero mixtos con cubiertas de plástico (Bistoni et al., 2010), secadero industrial híbrido solar biomasa que permite la producción continua de pimiento desecado (Condorí et al., 2010).

El objetivo del presente trabajo fue determinar los parámetros que caracterizan la cinética de secado, el comportamiento de las muestras con y sin tratamientos, así como los modelos que lo representan, en un túnel de secado de laboratorio y en un secadero solar en convección natural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las manzanas fueron lavadas y cortadas en rodajas entre 4 y 5 mm de espesor y con diámetros aproximados de 7,9 cm. Las muestras fueron divididas en dos lotes y cada uno fue tratado previamente con uno de los siguientes tratamientos: a) Inmersión en una solución de metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_5$) al 0,5 % durante 3 minutos y b) Inmersión en jugo de limón al 10 % durante 15 minutos. Se tomaron tres repeticiones para cada tratamiento, así como para las muestras testigos, las que no fueron sometidas a ningún pretratamiento. Las muestras se pesaron con una balanza electrónica (Mettler $\pm 0,1\text{g}$). El peso seco del producto se obtuvo llevando tres muestras a estufa a 102°C hasta obtener peso constante.

Para medir la temperatura y humedad en los ensayos de secado se utilizaron Data Logger tipo HOBOS inalámbricos con sensores externos “smart sensor” que permite medir temperatura en el rango de -40°C a 75°C (precisión de $\pm 0,2^\circ\text{C}$, resolución de $0,02^\circ\text{C}$) y humedad relativa del aire entre 10 - 90 % (precisión de $\pm 2,5\%$, resolución de $0,1\%$). La velocidad del aire se midió con un anemómetro de hilo caliente, marca TSI 1650 ($\pm 0,05 \text{ m s}^{-1}$), en diferentes puntos en dirección longitudinalmente y transversalmente

Túnel de secado de laboratorio

El túnel de secado de laboratorio está formado por un tubo aislado de sección cuadrada de 0,31 m, cada lado. Es un sistema abierto sin recirculación del aire. El aire se calienta mediante seis resistencias eléctricas envainadas en cuarzo de 500 W cada una. Posee tres bandejas ubicadas al final del túnel. El aire del ambiente exterior al recinto de secado, es ingresado por succión mediante un ventilador centrífugo de $\frac{1}{2}$ HP (flujo de $0,041\text{kg s}^{-1}$). El aire circula en paralelo a las bandejas. En la figura 1 se muestra un esquema del túnel de secado de laboratorio: (1) Entrada de aire; (2) Ventilador centrífugo; (3) Resistencias; (4) Medidores temperatura, humedad y control de velocidad de aire; (5) Salida de aire.

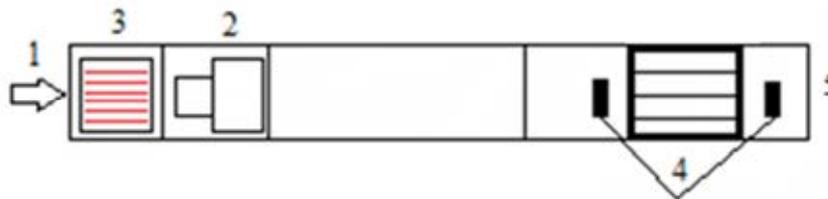


Figura 1: Esquema del secadero túnel de laboratorio

Secadero solar por convección natural

El secadero es tipo gabinete con estantes escalonados en donde se colocan las bandejas con el producto a secar. Consta de una caja con estructura de fierros con madera en los laterales y base. Sus dimensiones son 2 m de largo, por 1 m de ancho y 0,50 m de profundidad. En la base interior de la caja tiene una chapa pintada de negro para que funcione como un colector solar. El secadero está inclinado para favorecer la captación de la radiación solar, figura 2.

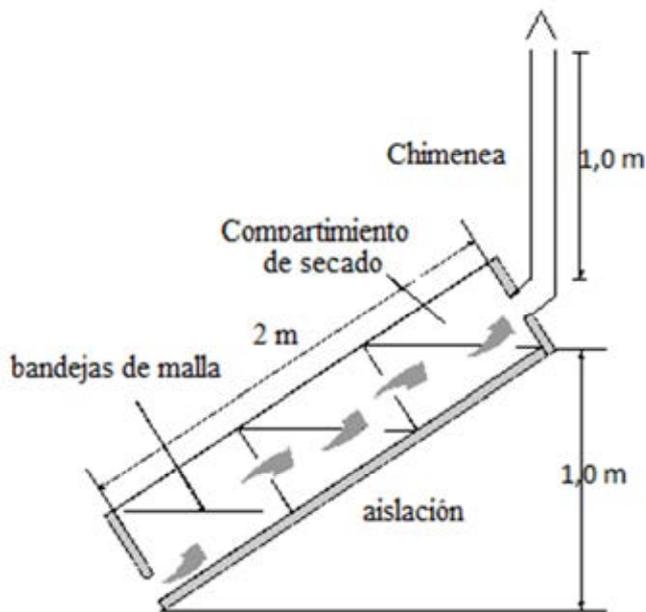


Figura 2: Esquema Secadero



Figura 3: Vista Secadero

El secadero está dividido en tres compartimentos, correspondiente a las tres bandejas que posee, figura 3. Estas partes están divididas por separadores de policarbonato, colocados en forma vertical respecto a la base del secadero. En estos separadores se han realizado tres orificios de 0,05 m de diámetro cada uno por donde circula el aire. La cubierta del secadero es de policarbonato alveolar de 6 mm de espesor y está dividida en las mismas tres partes. Cada una de estas cubiertas es rebatible sobre una de sus lados para facilitar la carga y descarga del secadero, ya que permite abrir los compartimentos independientemente sin tener que sacar toda la cubierta.

El aire ingresa al secadero por la base a través de sección de área de $0,20 \text{ m}^2$ y es obligado a circular por las bandejas a través de los agujeros que se encuentran en los separadores. Esta abertura está cubierta por tela "mosquitera" plástica. En la parte superior presenta una chimenea de 1,00 m de longitud y construida con caño de plástico de 0,10 m de diámetro. La circulación del aire es por convección natural, facilitada por la incorporación de la chimenea. Las bandejas constan de un marco de madera y malla media sombra doble (80 %) y van colocadas inclinadas respecto a la superficie horizontal, de manera tal que cuando el secadero está inclinado, las bandejas quedan horizontales.

Cinética de secado

Para determinar la cinética de secado en el túnel de laboratorio las muestras fueron pesadas cada 30 minutos hasta llegar a peso constante. En el secado solar las pesadas fueron horarias durante los días de secado.

La relación de humedad (MR) se define por la ecuación (1):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad [1]$$

donde M es el contenido de humedad instantánea; M_0 contenido de humedad inicial y M_e contenido de humedad de equilibrio. Como M_e generalmente es bajo para los productos alimenticios (Togrul y Pehlivan, 2004), se lo considera despreciable, por lo tanto, la relación de humedad (ecuación 1) se simplifica a (ecuación 2):

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad [2]$$

Para la determinación de los modelos que ajustan las curvas de secado experimentales se utilizaron las expresiones matemáticas detalladas por Sadegh Seiedlou et al. (2010). Las mismas se muestran en la tabla 1. Estos modelos fueron aplicados a los datos experimentales usando la técnica de regresión.

Nombre Modelo	Ecuación del modelo	Nombre Modelo	Ecuación del modelo
<i>Newton</i>	$MR = \exp(-k t)$	<i>Wang - Singh</i>	$MR = 1 + a t + b t^2$
<i>Page</i>	$MR = \exp(-k t^n)$	<i>Page modificado</i>	$MR = \exp[-(k t)^n]$
<i>Henderson - Pabis</i>	$MR = a \exp(-k t)$	<i>Verma et al.</i>	$MR = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-bt)$
<i>Logarítmico</i>	$MR = a \exp(-k t) + c$	<i>Thomson</i>	$t = a \ln(MR) + b (\ln(MR))^2$
<i>Aghbashlo</i>	$MR = \exp(-k_1 t / (1 - k_2 t))$	<i>Midilli y Kucuk</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

Tabla 1. Modelos matemáticos para describir la cinética de secado

El análisis se realizó mediante un software estadístico para regresión no lineal. El coeficiente R^2 fue uno de los principales criterios para la selección de la mejor ecuación. Además, para determinar el mejor ajuste se utilizaron los índices estadísticos chi-cuadrado reducido (χ^2), desviación media (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El modelo seleccionado para ajustar las curvas de secado se determinó considerando el valor más alto de R^2 y los valores más bajos de χ^2 , MBE y RMSE. Por otro lado se desecharon los modelos en que las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y aquellos en que la correlación de los coeficientes estimados no fue superior a 0,80. Los índices estadísticos se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - z} \quad [3]$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad [4]$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i}) \quad [5]$$

donde: MR_{exp} : relación de humedad experimental; MR_{pred} : relación de humedad predicha; z: número de constantes en el modelo; N: número de datos

Determinación de la difusividad efectiva de humedad

Durante el proceso de secado, conforme el agua se evapora de la superficie del producto, ocurre la migración de agua desde el interior del sólido; cuando esta migración no es suficientemente rápida como para mantener la superficie saturada, la migración interna del agua se vuelve un factor que controla la velocidad de secado. Para determinar el coeficiente difusión D se puede utilizar la segunda ley de Fick (ecuación 6), que relaciona las variaciones del contenido de humedad de la muestra (en este caso agua) con el tiempo y la geometría, durante el proceso de secado (Panchariya et al., 2002).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \quad [6]$$

donde M es el contenido de humedad, t es el tiempo en segundos y r es espesor en metros. Para la resolución de la ecuación 6, se considera que el coeficiente de difusión es un coeficiente de difusión promedio, difusión efectiva D_{ef} y que la muestra es una placa plana infinita, con una distribución de humedad inicial uniforme, no tiene encogimiento y no existen resistencias al transporte de masa (Crank, 1975); obteniéndose la siguiente relación de humedad MR (ecuación 7):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2}\right] \quad [7]$$

donde D_{ef} es el coeficiente de difusividad efectiva ($m^2 s^{-2}$), L es el espesor de la placa (m), t tiempo en segundos y n es un número positivo entero. Para tiempos de secado suficientemente largo, se puede tomar $n = 1$, con un error pequeño y la ecuación 7 queda (ecuación 8):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2}\right) \quad [8]$$

El coeficiente de difusividad efectiva (D_{ef}) engloba los efectos de todos los fenómenos que pueden intervenir en la migración o pérdida de agua y su valor se calcula a través de los modelos matemáticos de la tabla 1, ajustados con los valores experimentales. Al tomar logaritmo natural en ambos miembros de la ecuación 8, se obtiene una ecuación que representa una recta, cuya pendiente depende de D_{ef} :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2}\right) \quad [9]$$

Calculando el $\ln(MR)$ con los datos experimentales y graficando en función del tiempo, se determina el valor de la pendiente. Con el espesor de la lámina (L), se obtiene el coeficiente de difusión efectiva promedio durante el tiempo de secado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del comportamiento térmico del secadero

En la tabla 2 se muestran los valores máximos sobre la bandeja superior ($T_{a,sB3}$) de los parámetros característicos del secadero, para los dos primeros días. En el primer día el máximo de la temperatura sobre última bandeja ocurre a las 13,57 hora local, mientras que el segundo día a las 13,62 hora local. Como estos valores son aproximadamente iguales se advierte que la contracción del producto entre el primer y segundo día no fue significativa.

	1er. Día	2do. Día
Irradiancia (I) [$W m^2$]	1029	1003
Temperatura aire ambiente exterior ($T_{a,ext}$) [$^{\circ}C$]	43,5	47,6
Temperatura aire bajo bandeja inferior ($T_{a,bB1}$) [$^{\circ}C$]	46,7	49,5
Temperatura aire sobre bandeja inferior ($T_{a,sB1}$) [$^{\circ}C$]	69,3	72,6
Temperatura aire sobre bandeja media ($T_{a,bB2}$) [$^{\circ}C$]	72,2	81,8
Temperatura aire sobre bandeja superior ($T_{a,sB3}$) [$^{\circ}C$]	79,9	89,6

Tabla 2. Valores característicos del colector solar para la máxima Irradiancia

En la figura 4 se muestran las temperaturas, para distintos puntos en el recorrido del aire en el secadero y la irradiación incidente sobre superficie horizontal, para los 2 primeros días de los 5 días de secado. Del análisis de los datos experimentales de las temperaturas del aire en el interior del secadero, se advierte que la temperatura del aire se incrementa cuando asciende por el mismo, hasta llegar a la última bandeja.

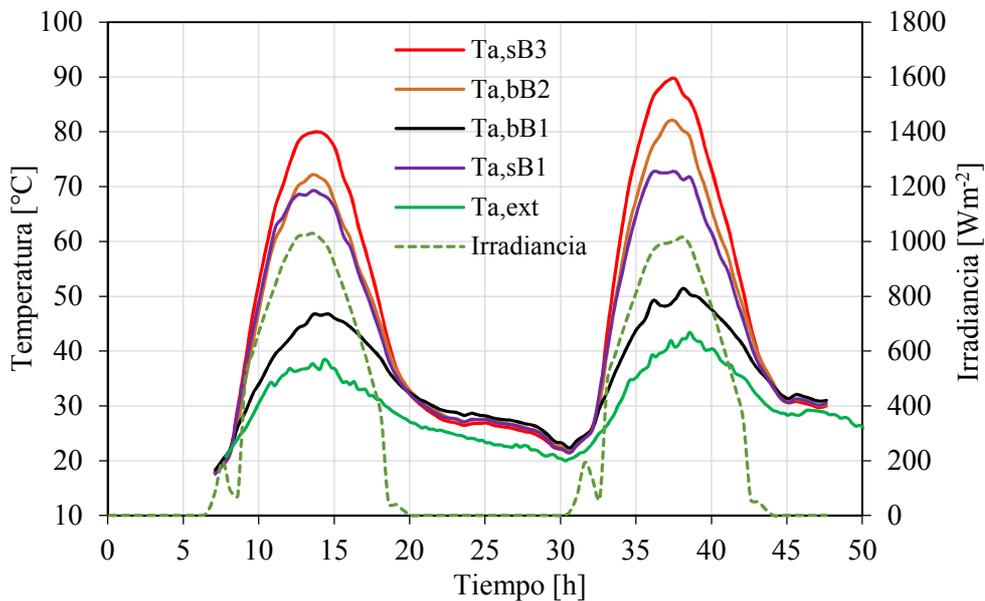


Figura 4. Variación de la temperatura del aire en el interior del secadero e irradiación incidente sobre superficie horizontal en función del tiempo.

Análisis de los datos del túnel de secado de laboratorio

El contenido inicial de humedad de la manzana fue de 85,1 % base húmeda, es decir 5,71 kg kg⁻¹ base seca (b.s.). Durante los primeros 30 min la pérdida de humedad fue lineal, evidenciando la existencia del período de secado a velocidad constante. Para analizar la cinética de secado durante el período de velocidad variable se consideraron los siguientes contenidos de humedad iniciales: muestra M1: 3,37267 kg kg⁻¹ b.s., muestra M2: 3,6722 kg kg⁻¹ b.s. y la muestra testigo Mt: 3,78109 kg kg⁻¹ b.s.

La variación del contenido de humedad respecto al tiempo de secado para los pretratamientos y el testigo, durante el periodo de velocidad variable, se muestran en la figura 6. Se observa que el contenido de humedad de las muestras disminuye exponencialmente con el tiempo de secado. Al inicio del proceso, durante una hora las muestras pre tratadas (M1 y M2) tienen una diferencia en la pérdida de humedad del orden del 8 %, pero hacia la mitad del secado ambas llegan a tener aproximadamente el mismo contenido de humedad, evidenciándose la diferencia en las variaciones del contenido de humedad de las muestras tratadas con la no tratada (testigo).

Para valores iguales de tiempo de secado (5,5 horas) se observa que el contenido de humedad para la muestra M1 pasa de 3,37 a 0,02 kg kg⁻¹ bs, la M2 de 3,67 a 0,05 kg kg⁻¹ bs y la muestra testigo Mt de 3,78109 a 0,42 kg kg⁻¹ bs. La duración del secado para la muestra testigo fue un 37 % más del tiempo empleado por las muestras tratadas, teniendo una diferencia en el contenido de humedad del orden del 6 % respecto al peso constante de las muestras tratadas.

En la figura 7 se observa que la velocidad de secado disminuye continuamente con la disminución del contenido de humedad. El proceso de secado presentó diferentes velocidades medias para cada una de las muestras: la muestra testigo tiene una velocidad media de 0,54 kg kg⁻¹ h⁻¹, con un máximo de 0,95 y un mínimo de 0,10 kg kg⁻¹ h⁻¹. Para la muestra con tratamiento M1 la velocidad media fue de 0,60 kg kg⁻¹ h⁻¹ y con un máximo de 0,92 kg kg⁻¹ h⁻¹ y un mínimo de 0,17 kg kg⁻¹ h⁻¹, mientras que para la muestra M2 la velocidad media fue de 0,64 kg kg⁻¹ h⁻¹, la máxima de 0,998 kg kg⁻¹ h⁻¹ y la mínima de

0,093 kg kg⁻¹ h⁻¹. Las muestras con tratamiento, si bien tienen diferentes velocidades promedio, finalizan prácticamente con la misma velocidad de secado.

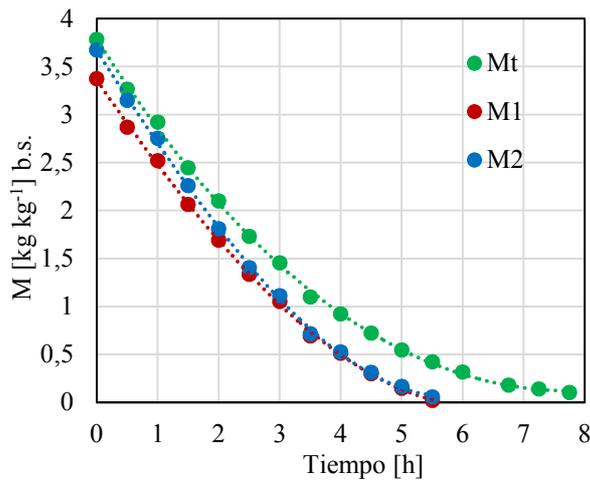


Figura 6. Contenido de humedad de la manzana con y sin tratamientos, túnel de secado laboratorio

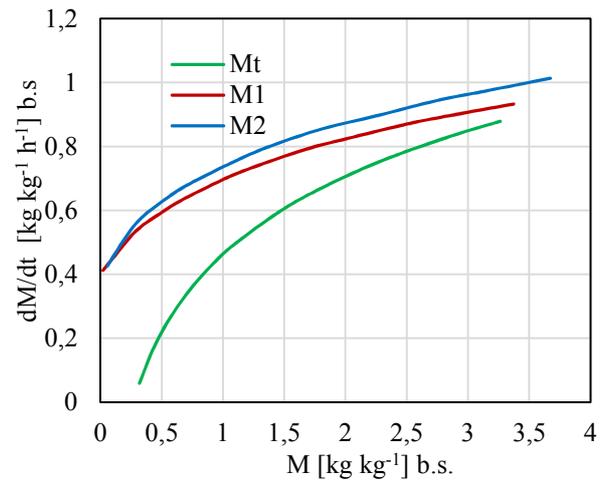


Figura 7. Velocidad de secado de la manzana con y sin tratamientos en túnel de secado de laboratorio

Las velocidades de secado de cada muestra (V_s), ajustadas por cuadrados mínimos, en función del contenido de humedad (M) y del tiempo (t) durante el proceso de secado en túnel de laboratorio, se detallan en la tabla 3. Los subíndices t , 1 y 2 se refieren a la muestra testigo y a los tratamientos 1 y 2 respectivamente.

$V_{st} = 0,3519 \ln (M_t) + 0,6424 \quad R^2 = 0,9901$	$V_{st} = - 0,0024 t^2 - 0,1322 t + 0,9765 \quad R^2 = 0,9985$
$V_{s1} = 0,2381 \ln (M_1) + 0,6161 \quad R^2 = 0,9919$	$V_{s1} = - 0,0119 t^2 - 0,0715 t + 0,9220 \quad R^2 = 0,9990$
$V_{s2} = 0,3374 \ln (M_2) + 0,6557 \quad R^2 = 0,9985$	$V_{s2} = - 0,0216 t^2 + 0,0459 t + 0,998 \quad R^2 = 0,9990$

Tabla 3. Ecuaciones de velocidad de secado en túnel en función del contenido de humedad y el tiempo

Análisis del secado solar con convección natural

El contenido inicial de humedad de la manzana fue de 84 % base húmeda. A los efectos de simplificar el análisis y discusión de los resultados, se presentan los datos correspondientes a la bandeja del medio.

En la figura 8 se muestra el contenido de humedad de las muestras M1, M2 y testigo (Mt), para el deshidratado de manzana en el secadero solar. El contenido de humedad de las muestras al inicio del proceso fue de 5,25 kg kg⁻¹ bs., llegando a las 21 horas de secado, sin contar el periodo nocturno, a niveles de 0,11 y 0,05 kg kg⁻¹ bs, muestras M1 y M2 respectivamente, mientras que el testigo llega a 0,61 kg kg⁻¹ bs.. Es decir que las muestras perdieron el 97,9 % (M1), 99,0 % (M2) y 88,4 % (Mt) de agua. Se advierte claramente la diferencia entre las distintas curvas de las muestras pretratadas y el testigo. Una vez finalizado el proceso, las rodajas de manzana fueron retiradas del secadero y acondicionadas en cajas y separadas en capas mediante papel, para lograr su homogeneización respecto al contenido de humedad.

En la figura 9 se muestran las gráficas correspondientes a la variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y en la tabla 4 se detallan las ecuaciones de las curvas de velocidad de secado de cada muestra, en función del contenido de humedad y del tiempo durante el proceso de secado solar, ajustadas por cuadrados mínimos. Se observa que la velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso, reduciéndose logarítmicamente a medida que el contenido de humedad fue disminuyendo. Advirtiéndose además, que las muestras pretratadas mantienen entre ellas aproximadamente la misma diferencia de velocidad. Los subíndices t , 1 y 2 se refieren a la muestra testigo y a los tratamientos 1 y 2 respectivamente.

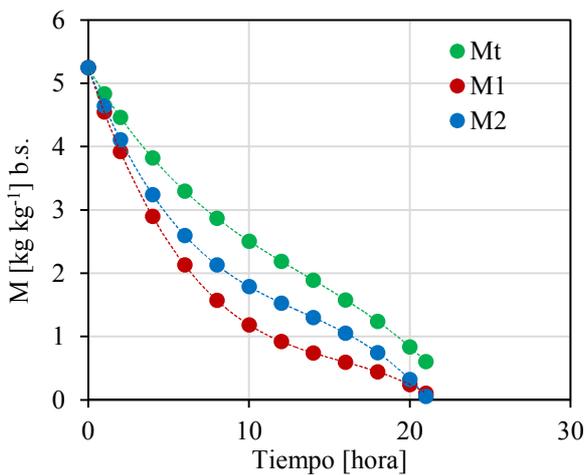


Figura 8. Contenido de humedad de la manzana con y sin tratamiento, secado solar

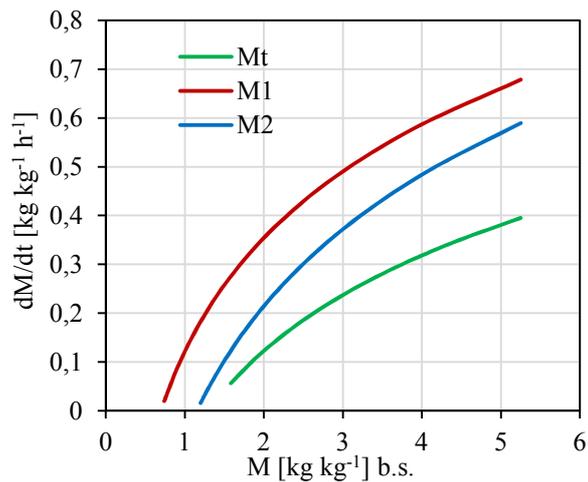


Figura 9 Variación de la velocidad de secado solar en función del contenido de humedad

$V_{st} = 0,2823 \ln (Mt) - 0,0731$	$R^2 = 0,9246$	$V_{st} = 0,0016 t^2 - 0,0424 t + 0,4333$	$R^2 = 0,9990$
$V_{s1} = 0,3362 \ln (M1) + 0,1211$	$R^2 = 0,9664$	$V_{s1} = 0,0027 t^2 - 0,0858 t + 0,7445$	$R^2 = 0,9990$
$V_{s2} = 0,3888 \ln (M2) - 0,0553$	$R^2 = 0,9522$	$V_{s2} = 0,003t^2 - 0,0799t + 0,6453$	$R^2 = 0,9990$

Tabla 4. Ecuaciones velocidad de secado solar en función del contenido de humedad y del tiempo

Modelado de las curvas de secado

De todos los modelos ajustados se seleccionaron aquellos con más alto R^2 , y los valores más bajos de χ^2 , RMSE, MBE, detallándose los resultados del análisis estadístico para el túnel de laboratorio, Tabla 5, y secadero solar tabla 6. El resto de los modelos fueron desechados porque las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y/o la correlación de los coeficientes estimados fue superior a 0,80.

Modelo	Tratamientos	R^2	χ^2	RMSE	MBE
NEWTON	Testigo	0,984	0,00155642	0,03819869	0,04345388
	Jugo de Limón	0,965	0,00392126	0,05995408	0,03284654
	Metabisulfito	0,966	0,00387148	0,05957225	0,02538925
PAGE	Testigo	0,998	0,00017616	0,01241533	0,05295948
	Jugo de Limón	0,994	0,000785	0,02557666	0,08908734
	Metabisulfito	0,996	0,00052059	0,02082837	0,07359535
HENDERSON PABIS	Testigo	0,988	0,0012746	0,0333957	0,12640818
	Jugo de Limón	0,971	0,00356727	0,05452269	-0,134347
	Metabisulfito	0,972	0,00341224	0,05332479	0,13385232
AGHBASHLO	Testigo	0,999	0,000068495	0,00774162	0,00084235
	Jugo de Limón	0,999	0,00009633	0,00895964	0,02220384
	Metabisulfito	0,999	0,000062952	0,00724296	0,00183495

Tabla N° 5. Túnel convección forzada (laboratorio)

Modelo	Tratamientos	R^2	χ^2	RMSE	MBE
NEWTON	Testigo	0,998	0,00012683	0,00157912	0,00157912
	Jugo de Limón	0,999	0,00095264	0,00882855	0,00157955
	Metabisulfito	0,995	0,00047031	0,01961634	0,00191555
PAGE	Testigo	0,998	0,00011523	0,00970957	0,00078036
	Jugo de Limón	0,999	0,00007641	0,00169709	0,00790699
	Metabisulfito	0,999	0,00012751	0,010214	0,00064145

HENDERSON PABIS	<i>Testigo</i>	0,998	0,00011395	0,00016559	0,00965585
	<i>Jugo de Limón</i>	0,999	0,00009,451	0,00879395	0,00879395
	<i>Metabisulfito</i>	0,996	0,0003531	0,01699713	0,00162427
AGHBASHLO	<i>Testigo</i>	0,998	0,00012586	0,01014768	0,00140950
	<i>Jugo de Limón</i>	0,999	0,00004767	0,00624582	0,00123248
	<i>Metabisulfito</i>	0,999	0,00012915	0,0102797	0,00041581

Tabla 6. Secadero solar convección natural

Para la cinética de secado correspondiente a los ensayos en túnel de laboratorio y en secadero solar con convección natural, el mejor ajuste fue el de Aghbashlo et al. (2009). La variación de la relación de humedad experimental y predicha para este ajuste en ambos secaderos se muestra en la figura 10. Esto reafirma que el modelo de Aghbashlo proporcionó un buen acuerdo entre las relaciones de humedad, experimental y predicha.

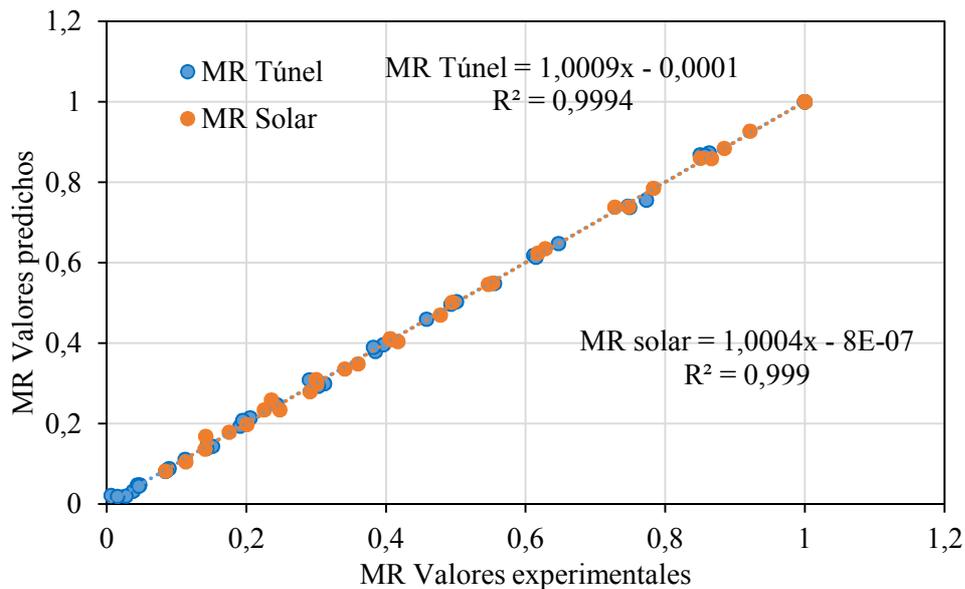


Fig. 10. Variación de la relación de humedad experimental y predicha para ambas experiencias para ajuste de Aghbashlo

Cálculo de la Difusividad efectiva de la humedad

Durante el proceso de secado, en el túnel de laboratorio y secadero solar, las experiencias fueron realizadas hasta peso constante y se obtuvo los coeficientes de difusión mediante el logaritmo natural de MR, ecuación 9. En las figuras 11 y 12 se muestran las gráficas del Ln(MR) en función del tiempo para los dos tipos de secado. Las pendientes de estas curvas permiten obtener la difusividad efectiva de las rodajas de manzana, tabla 7.

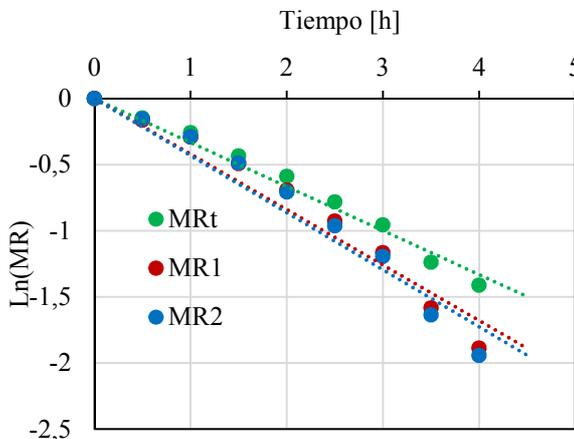


Figura 11. Correlación logarítmica para curvas en túnel de secado convección forzada

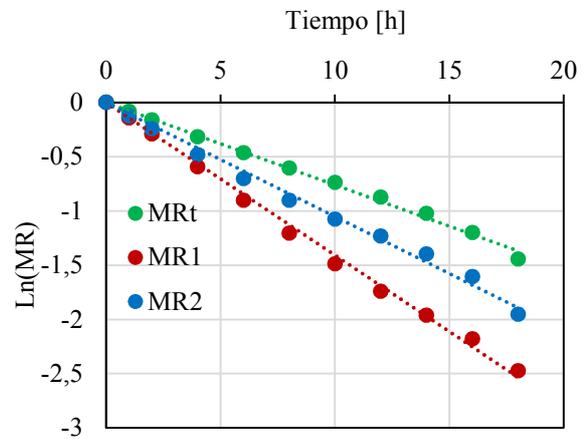


Figura 12. Correlación logarítmica para curvas en secado solar convección natural

Método de secado	Espesor Rodajas [mm]	Difusión Efectiva [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	R ²
Túnel Lab. Mt	4,744	$8,4244 \cdot 10^{-10}$	0,983049
Túnel Lab. M1	4,844	$1,1076 \cdot 10^{-9}$	0,958490
Túnel Lab. M2	4,575	$1,0167 \cdot 10^{-9}$	0,955372
Solar Mt	4,760	$1,9244 \cdot 10^{-10}$	0,995491
Solar M1	4,850	$3,5686 \cdot 10^{-10}$	0,996106
Sola M2	4,560	$2,662710^{-10}$	0,992389

Tabla 7. Difusión efectiva de las rodajas con ambos secaderos.

CONCLUSIONES

El método de secado con aire por convección forzada dio como resultado una velocidad de secado promedio de $0,63 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, mientras el secado con energía solar en convección natural una velocidad de secado promedio de $0,22 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

En el secado en el túnel de laboratorio las muestras tratadas con jugo de limón presentaron una diferencia del 7 % en el contenido de humedad respecto a las tratadas con metabisulfito de sodio al finalizar el proceso. En el secado solar la diferencia entre el tratamiento con limón respecto al metabisulfito de sodio es del 1%. En ambos casos los tratamientos cumplen su cometido, obteniéndose con respecto a la muestra testigo una diferencia en el contenido de humedad final del orden 10 %, tanto en el secadero túnel de laboratorio como en el secadero solar. Los pretratamientos son aconsejables para obtener un producto de buena calidad. El ácido cítrico y el metabisulfito de sodio evitaron el pardeamiento de la fruta, pero se aconseja el uso del primero por no presentar toxicidad.

El modelo propuesto por Aghbashlo fue el más adecuado para describir el comportamiento de secado de rodajas de manzana, tanto en el secadero túnel de laboratorio como en el solar con convección natural. Si bien ambos responden a este modelo, los parámetros de ajuste son diferentes. De esta manera se dispone de un modelo que tiene el valor más alto de R² y con valores razonables de χ^2 , MBE y RMSE, con un coeficiente de confianza del 95 %.

El modelo de difusión de Fick, para un coeficiente de difusión promedio D_{ef} , mostró un buen ajuste lineal con respecto a los resultados experimentales obtenidos de los dos secaderos y permitieron estimar la difusividad efectiva de la humedad. La difusividad de humedad efectivas están entre $1,017 \times 10^{-9}$ a $8,424 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el secado en túnel y $1,924 \times 10^{-10}$ a $3,569 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para secado solar.

REFERENCIAS

- Aghbashlo, M., M.H. Kianmehr, S. Khani and M. Ghasemi, (2009). Mathematical modeling of carrot thin-layer drying using new model. *Int. Agrophysic.*, Vol. 23: 313–317.
- Bistoni S., Iriarte A., García V. y M. Watkins, (2008). Estudio de un ensayo de secado de tomate en secadero solar indirecto, *Investigaciones en Facultades de ingeniería del NOA, CODINOA*, Vol. 2, pp. 55- 60.
- Bistoni S., Iriarte A., Luque V. y S. Gómez, (2010). Evaluación del comportamiento de un secador solar mixto para pequeños productores, *Investigaciones en Facultades de ingeniería del NOA, CODINOA*, Vol 2, 295- 300.
- Crank, (1975). *The Mathematics of diffusion*. Oxford University Press, London
- Condorí M., Durán G., Vargas D. y R. Echazú, (2009). Secador solar híbrido. Primeros ensayos, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 13, pp 02.35- 02.42.

- Condorí M., Durán G., Echazú R.y G. Diaz Russo, (2010). Secador industrial híbrido solar- biomasa para la producción continua de pimiento deshidratado, *Energías Renovables y medio ambiente*, Vol 25, pp 81-92.
- Hossain M.A. y B.K Bala, (2007). Drying of hot chilli using solar tunnel drier, *Solar Energy*, Elsevier, Vol 81, pp 85-92.
- Jairaj K.S., Singh S.P. y K.Srikant, (2009). A review of solar dryers developed for grape drying, *Solar Energy*, Elsevier, Vol 83, pp. 1698-1712.
- Kaya A., Aydin O., Demirtas C. (2007): Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering*, Vol. 96, pp517–524.
- Krokida, M.K. and Z.B. Maroulis, (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Dry. Technol.*, Vol.15: 1145–1155.
- Lewicki P P., Jakubczyk E. (2004): Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, Vol. 64, pp 307–314.
- Lewicki P.P. (2006): Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology*, Vol 17, pp. 153–163.
- Pangavhane D., R. Sawhney y P. Sarsavia, (2002). Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, Vol. 27, pp 579-590.
- Sadegh Seiedlou, Hamid R. Ghasemzadeh, Nasser Hamdami, Faramarz Talati, Mohammad Moghaddam. (2010). *International Journal of Agriculture & Biology*, pp 171–178.
- Togrul y Pehlivan, 2004. Togrul, I.T. & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65, pp.413–425.
- Velic D., Planinic M., Tomas S., Bilic M. (2004): Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, Vol. 64, pp. 97–102.

DRYING KINETICS AND MODELLING OF APPLE IN FORCED LABORATORY DRYER AND IN A SOLAR UNDER NATURAL CONVECTION

ABSTRACT: In the present work, apple drying in a forced convection laboratory tunnel and in a natural convection solar dryer is analyzed. Dryers and drying kinetics for both devices are described, as well as the thermal evaluation of the solar dryer. In both cases the product was previously treated with lemon juice and sodium meta bisulfite. The influence that both treatments have on the final product is studied. Ten mathematical drying models were used to adjust the experimental data. According to the statistical criteria (R^2 , χ^2 , MBE and RMSE), the Aghbashlo model was the best, in both dryers, for describing the drying behavior of the apple slices. The treatment with lemon juice in the two trials resulted in faster drying, better appearance and less toxicity.

Keyword: drying kinetic, natural convection drying, apple, pretreatment

CIRCUITO TÉRMICO PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL UTILIZANDO UN CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO. DISEÑO, DESARROLLO Y EVALUACIÓN TÉRMICA.

J. Garnica, J. Daghero, D. Longoni, M. Ortiz

Grupo de Energía Solar. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto.
Ruta 36. Km 601. X5804BYA – Río Cuarto. Prov. de Córdoba
Tel. 0358-4676249 – Fax 0358-4676246 e-mail: jorgedanieldaghero@gmail.com

Recibido 10/08/18, aceptado 18/09/18

RESUMEN: En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo y estudio de funcionamiento de un circuito térmico para la generación de vapor de agua de baja entalpía destinado al uso industrial utilizando un prototipo de concentrador cilíndrico parabólico (CCP) con un área de apertura de 2,5 m². Se propone el uso de un fluido de transferencia térmica en un circuito que involucra el uso de equipos y accesorios resistentes a la temperatura y disponibles en el mercado local. En las primeras evaluaciones, en el estado estacionario, el fluido térmico alcanzó una temperatura máxima de 128 °C a la salida del concentrador con un salto térmico promedio de 6 °C. El rendimiento térmico del CCP fue del 20,4 %. El caudal de vapor generado en estado estacionario fue de 0,63 kg/h lo cual permite inferir que el rendimiento térmico global del sistema fue del 16,4 %.

Palabras clave: Energía solar, concentrador cilíndrico parabólico, circuito térmico, producción de vapor.

INTRODUCCIÓN

Si se compara a nivel mundial el consumo energético de la industria, el transporte, los hogares y el sector de servicios puede observarse que el sector industrial tiene el mayor consumo de energía siendo aproximadamente del 30 %. Sólo un tercio de esta demanda está relacionada con la energía eléctrica, mientras que los dos tercios restantes están asociados a la energía térmica. La mayor parte de esta energía demandada por las empresas comerciales e industriales para sus procesos de producción, requieren niveles de temperatura que están por debajo de 250 °C. (Weiss y Rommel, 2008).

Los concentradores cilíndrico parabólicos (CCP) de tamaño reducido se consideran los más apropiados para estas aplicaciones. Un importante argumento en su favor es que los colectores solares de baja temperatura (colectores planos, colectores de tubos evacuados y concentradores parabólicos compuestos) no tienen la capacidad de alcanzar las temperaturas requeridas de manera eficiente. Por otro lado, los concentradores solares utilizados para generación de energía eléctrica son mucho más grandes que los requeridos en los procesos industriales donde los rangos de temperatura de trabajo son menores. Estas aplicaciones tienen fuertes limitaciones de espacio comparadas con las plantas solares para la producción de energía eléctrica. Las fábricas están generalmente ubicadas en zonas industriales donde el precio del suelo es caro, por lo que la instalación del campo solar debe realizarse en espacios reducidos, tales como los techos. Por lo tanto, estos equipos deben ser modulares, pequeños (ancho de apertura inferior a 3 m), livianos y de bajo costo (Fernández García et al 2015).

El creciente interés por esta tecnología ha hecho que instituciones públicas y compañías privadas desarrollaran prototipos. Desde 2008, La Plataforma Solar de Almería (PSA) perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), ha diseñado, construido y evaluado concentradores cilíndrico parabólicos de pequeño tamaño para producir energía térmica a temperaturas hasta 250 °C. Estos concentradores permiten cubrir la demanda en procesos industriales o en acondicionamiento de edificios y para los que, no existen soluciones comerciales que presenten una

adecuada relación costo-beneficio y que aprovechen el uso de la energía solar (Plataforma Solar de Almería, 2018). Así mismo, este centro de investigación ha desarrollado un circuito de ensayo térmico solar para establecer el rendimiento de estos concentradores bajo condiciones de trabajo al aire libre (Fernández García et al 2018).

En México, una empresa local ha desarrollado este tipo de concentradores de característica modular y ha instalado los mismos en más de 40 empresas alrededor del país para cubrir la carga térmica de sus procesos o disminuir el consumo de combustibles fósiles (Inventive Power, 2018). El Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey junto a esta empresa ha desarrollado un programa computacional que predice la producción de energía del sistema con este tipo de colectores (Tagle et al., 2016)

En Argentina, se evaluó un CCP de estas características utilizando un fluido caloportador con el fin de aprovechar la energía térmica en un ciclo de refrigeración por absorción (Dri et al., 2009).

En trabajos anteriores se presentó el diseño del prototipo disponible en el Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto (Daghero et al., 2013) y su evaluación óptica y térmica (Daghero et al., 2015).

El objetivo de este trabajo es el diseño y desarrollo del circuito térmico del prototipo disponible con el fin de generar vapor de agua de baja entalpía. Se propone además la realización de ensayos que permitan estimar su rendimiento térmico.

EL CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO

El prototipo disponible consiste en un módulo de $2,5 \text{ m}^2$ de superficie efectiva de captación. En la Figura 1 se muestra una imagen de la sección transversal del prototipo mientras que en la Tabla 1 se detallan sus características principales

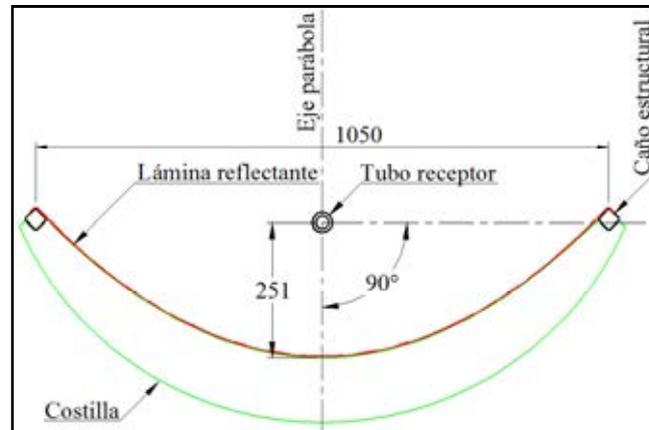


Figura 1: Sección transversal de la superficie reflectante (dimensiones en mm)

El eje de rotación del concentrador (línea focal), es perpendicular al plano de la eclíptica, de modo que la superficie de captación está orientada hacia el norte y gira en el sentido de este a oeste. La inclinación del eje con respecto al plano horizontal es regulable según el día del año. El concentrador consta de una estructura móvil sobre la que apoya la lámina reflectante y otra estructura soporte fijada a la plataforma de ensayo. El sistema de fijación del tubo receptor permite la rotación de la estructura móvil alrededor de la línea focal que coincide con el eje del tubo receptor. La estructura fijada a la plataforma puede adaptarse a dos posiciones regulables con una varilla roscada para lograr el ángulo de inclinación adecuado tanto para el período estival (entre 12° y 32°) como para el período invernal (entre 32° y 51°). En las Figura 2 se muestran las vistas del prototipo obtenido utilizando un programa de diseño asistido por computadora para Diciembre y Julio correspondientes al mínimo ángulo de inclinación, 12° en Diciembre y al máximo, 51° en Julio.

Ancho del concentrador (m)	1,050
Largo del concentrador (m)	2,390
Área de apertura (m ²)	2,500
Angulo de borde	90°
Distancia focal (m)	0,251
Reflectividad de la lámina reflectante 4400 GP (%)	> 95
Diámetro ext. del tubo receptor (mm)	25,5
Diámetro ext. del tubo de vidrio aislante (mm)	65
Razón de concentración	13,1

Tabla 1: Características principales del CCP



Figura 2: Posiciones extremas del CCP: (a) Diciembre (12°). (b) Julio (51°)

A diferencia del trabajo anterior (Daghero et al., 2015) en el que se utilizó un tubo receptor de 1,5", se decidió sustituirlo por un tubo de 1" con el fin de aumentar la razón de concentración. El diseño del CCP exige que la entrada y salida del fluido térmico estén ubicadas en la parte inferior por lo que se utilizó un tubo interior concéntrico de 5/8". De esta manera se obtienen secciones de flujo similares en el ánulo y en el tubo interior. El fluido ingresa por el ánulo y retorna por el tubo interior. Además, se colocó un tubo de vidrio borosilicato de 65 mm para aislar el tubo receptor con el fin de minimizar las pérdidas de calor por convección. La sujeción de los tubos en los extremos se logró por medio de bujes de Viton, fluoroelastómero que resiste temperaturas de hasta 280 °C, los mismos fueron diseñados y enviados a construir para este fin específico. En la Figura 3 se muestra el prototipo en su posición invernal.

EL CIRCUITO TÉRMICO

En el diseño y desarrollo del circuito térmico, se optó por utilizar un fluido térmico, ya que, en el rango de temperatura que se pretende trabajar, éstos tienen larga vida, buena estabilidad térmica y presión de vapor reducida; además, los riesgos de incendio por posibles pérdidas en el circuito son mínimos. Para estas condiciones de trabajo suele recomendarse el uso de agua presurizada, de esta manera se transforma en vapor de manera directa simplificando la configuración de la planta y maximizando la eficiencia global, sin embargo, en estos casos se requiere un sofisticado sistema de control debido al flujo en dos fases y una pérdida de carga elevada debido a la baja densidad del vapor luego de su expansión en la cámara de separación (Akbarzadeh y Valipour, 2018).



Figura 3: CCP instalado sobre la plataforma en posición invernal

Paratherm NF es el nombre comercial del fluido térmico seleccionado, se trata de un fluido a base de 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.

El diagrama del circuito desarrollado se muestra en la Figura 4 e involucra la utilización de tubos flexibles con doble malla de acero para conectar el tubo receptor al circuito térmico con el fin de permitir libertad de movimiento cuando se modifica la posición del CCP para ajustar su orientación.

El circuito cuenta con un generador de vapor construido en acero inoxidable con una serpentina por cuyo interior circula el fluido térmico. El generador está provisto de manómetro, y válvula de seguridad tipo resorte. Entre el generador de vapor y la bomba se ubica un tanque pulmón que permite absorber la variación de volumen del fluido por efecto de la temperatura. Se utilizaron vainas de acero inoxidable para colocar 2 termocuplas tipo T (cobre/constantán) en la entrada y salida del tubo receptor. Otra termocupla fue utilizada para la medición de la temperatura ambiente. Un sensor de radiación global se ubicó en el plano de captación del CCP. Estas termocuplas, antes de ser instaladas, fueron calibradas utilizando un baño termostático y un termómetro de mercurio. Para mejorar la transferencia de calor en el interior de las vainas se utilizó grasa siliconada.

La bomba seleccionada es de tipo engranaje Marca Venturi Serie A92, esta bomba se consideró adecuada, tanto por el bajo caudal requerido como por su resistencia a la temperatura ya que se solicitó al vendedor que fuera provista con sellos de Viton. Esta bomba, según la especificación del vendedor tiene un caudal máximo de 8 l/min y se optó por accionarla con un motor trifásico de 0,5 Hp. A este motor, se le incorporó en su alimentación, un variador de frecuencia (Altivar 11) el cual permite modificar la velocidad de rotación del motor y por ende el caudal del fluido. Se realizaron mediciones de caudal a circuito abierto para distintas frecuencias. El gráfico de la Figura 5 muestra los resultados obtenidos.

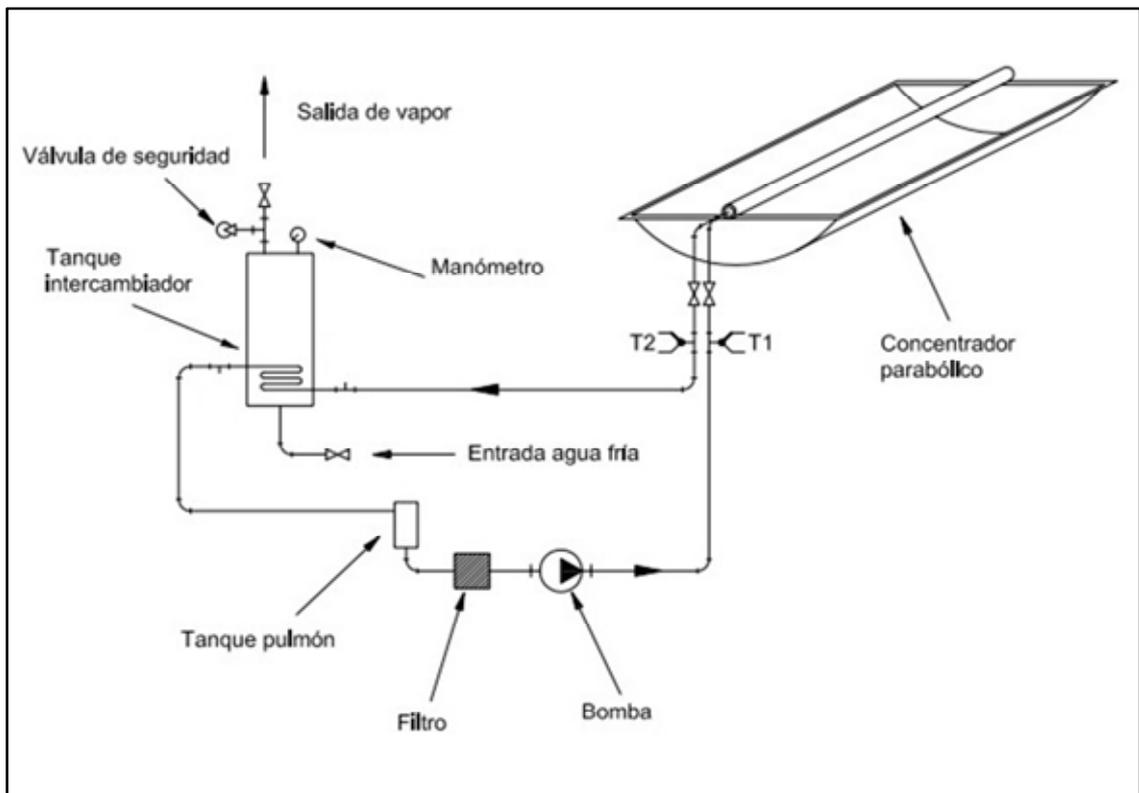


Figura 4: Diagrama del Circuito Térmico

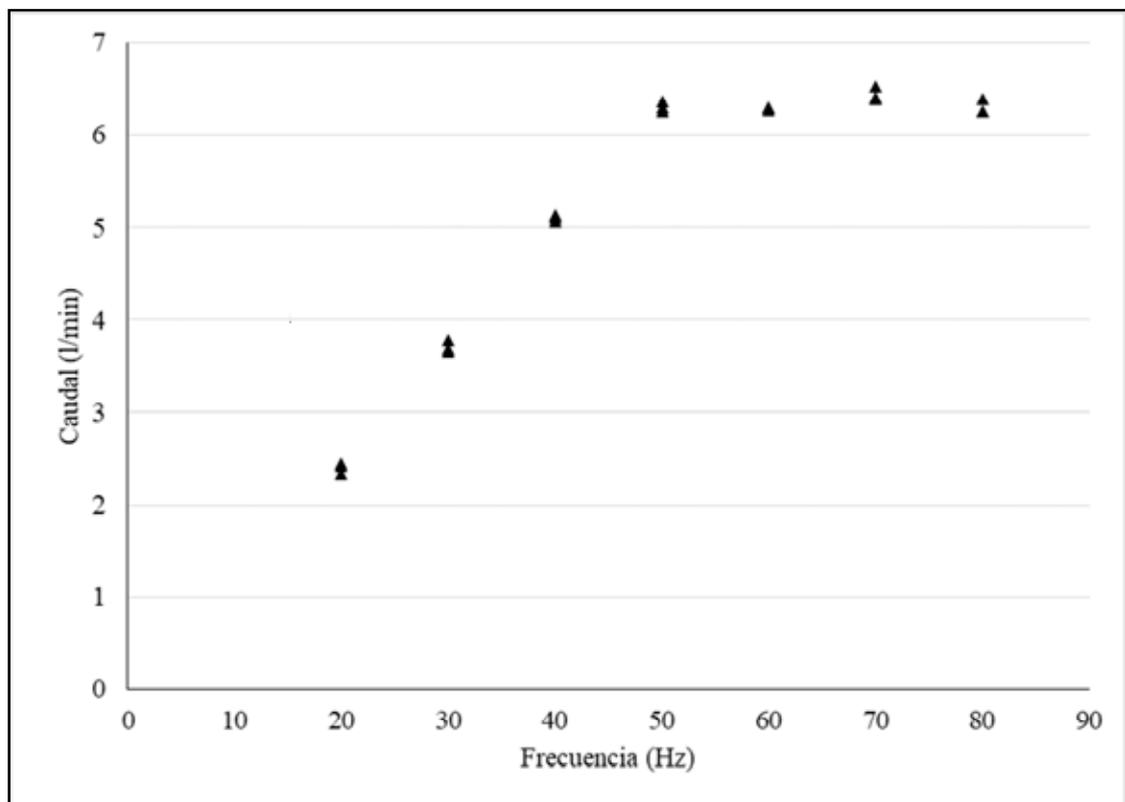


Figura 5: Caudal del fluido térmico para distintas frecuencias

Para determinar el tipo de flujo en el interior del tubo receptor, se calculó el número de Reynold usando los datos experimentales de caudal, y los datos de viscosidad y densidad del fluido térmico a una temperatura estimada en 120 °C. Para el caudal mínimo (2,4 l/min) y el máximo (6,3 l/min), los números de Reynold obtenidos fueron 1258 y 3300 respectivamente. Se deduce que para el caudal máximo se alcanza el régimen de flujo turbulento ($Re > 2300$). Sin embargo, se opta por utilizar para el cálculo, el caudal mínimo correspondiente a la frecuencia de 20 hz. De esta manera se maximiza el salto térmico en el tubo receptor; lo cual permite obtener una adecuada medición de ganancia de calor en el concentrador ya que se reducen los errores relativos en la medición de la temperatura.

Asumiendo un rendimiento térmico global del 30 %, se determinó, por medio de la Ecuaciones 1 y 2, que el prototipo sería capaz de generar 1,2 kg/h de vapor de agua.

$$q = \eta G A_a \quad (1)$$

$$\dot{m} = \frac{q}{h_{fg}} \quad (2)$$

CÁLCULO DEL AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El área de transferencia de calor necesaria, determina la longitud mínima requerida para la serpentina a utilizar en el generador de vapor.

Para ello, se eligió la correlación para el flujo de calor cuando se produce ebullición nucleada propuesta por Rohsenow dada por la Ecuación 3 (Bergman et al., 2011)

$$q''_s = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{C_{p,l}(T_s - T_{sat})}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3 \quad (3)$$

En esta ecuación, el coeficiente $C_{s,f}$ y el exponente n dependen de la combinación superficie-líquido, en este caso, acero inoxidable-agua. Los subíndices l y v denotan los estados de agua líquida saturada y vapor, respectivamente. Las propiedades del agua saturada corresponden a una presión manométrica de 0,5 bar, mientras que la temperatura de superficial T_s está involucrada en la Ecuación 4 que expresa la conducción de calor unidimensional en estado estable en tuberías

$$q = \frac{\bar{T}_i - T_s}{\frac{1}{\pi d_{in} L h_{th}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{in}}\right)}{2\pi k L}} \quad (4)$$

En esta ecuación, \bar{T}_i representa la temperatura promedio del fluido térmico en el interior de la serpentina, su determinación requiere conocer las temperaturas de entrada T_i y salida T_o del fluido térmico en la serpentina, las cuales están relacionada por medio de la Ecuación 5

$$q = \dot{m}_{th} C_{p,th} (T_i - T_o) \quad (5)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido térmico en el interior de la serpentina, h_{th} , se determina por medio de la correlación para flujo laminar dada por la Ecuación 6

$$h_{th} = 4,36 \frac{k}{d_{in}} \quad (6)$$

Mientras que la longitud de la serpentina está involucrada en la Ecuación 7

$$L = \frac{q}{q''_s \pi d_{ext}} \quad (7)$$

La solución de este conjunto de ecuaciones permite determinar la longitud de la serpentina para lo cual se requiere estimar una temperatura máxima del fluido térmico en el ingreso de la serpentina.

Para una serpentina de acero inoxidable de 3/8" de diámetro y asumiendo que el fluido térmico alcanzará una temperatura máxima de 130 °C en el ingreso de la serpentina, las ecuaciones anteriores permitieron determinar la longitud $L=0,7$ m.

Cabe aclarar que los cálculos han sido realizados usando el Sistema Internacional de Unidades, tal como se indica en la sección Nomenclatura al final de trabajo.

Para la construcción del generador se decidió utilizar una serpentina de 1 m de longitud. Los equipos, cañerías y accesorios fueron aislados con lana de vidrio mineral provista con cobertura de aluminio. En la Figura 6 se muestra dos imágenes del CCP conectado al circuito térmico construido.



Figura 6. Vistas del circuito térmico construido.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL CONCENTRADOR

Se realizó un ensayo experimental el día 29-06-2018 en las horas cercanas al mediodía solar (desde las 10:00 a las 15:00 hs aproximadamente). La superficie de captación fue orientada con el ángulo de inclinación máximo de 51° para lograr que la radiación solar incidente fuera normal a la misma. El flujo másico del fluido térmico fue fijado en 2,4 l/min.

En la Figura 7 se muestran las curvas de temperatura y de radiación del ensayo realizado. Se observan fluctuaciones de las temperaturas de entrada y salida en el comienzo del ensayo, debido probablemente al desenfoco producido por el inadecuado ajuste de la posición del plano del concentrador, la detección de las mismas permitió corregir estos problemas antes de alcanzar el estado estacionario. El rendimiento térmico del concentrador fue calculado experimentalmente utilizando la Ecuación 8

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{th} C_{p,th} (T_2 - T_1)}{GA_a} \quad (8)$$

Los valores de temperatura de entrada (T_1) y salida (T_2) del fluido térmico en el tubo receptor como así también la irradiación (G) corresponden al promedio de los valores experimentales cuando el sistema alcanzó el régimen estacionario, la línea vertical punteada del gráfico indica el momento a

partir del cual se considera el inicio del mismo. Con estos resultados se obtuvo un rendimiento térmico del concentrador $\eta_c = 20,4 \%$. Se alcanzó una temperatura máxima $T_2 = 128^\circ\text{C}$, mientras que salto térmico promedio fue aproximadamente 6°C .

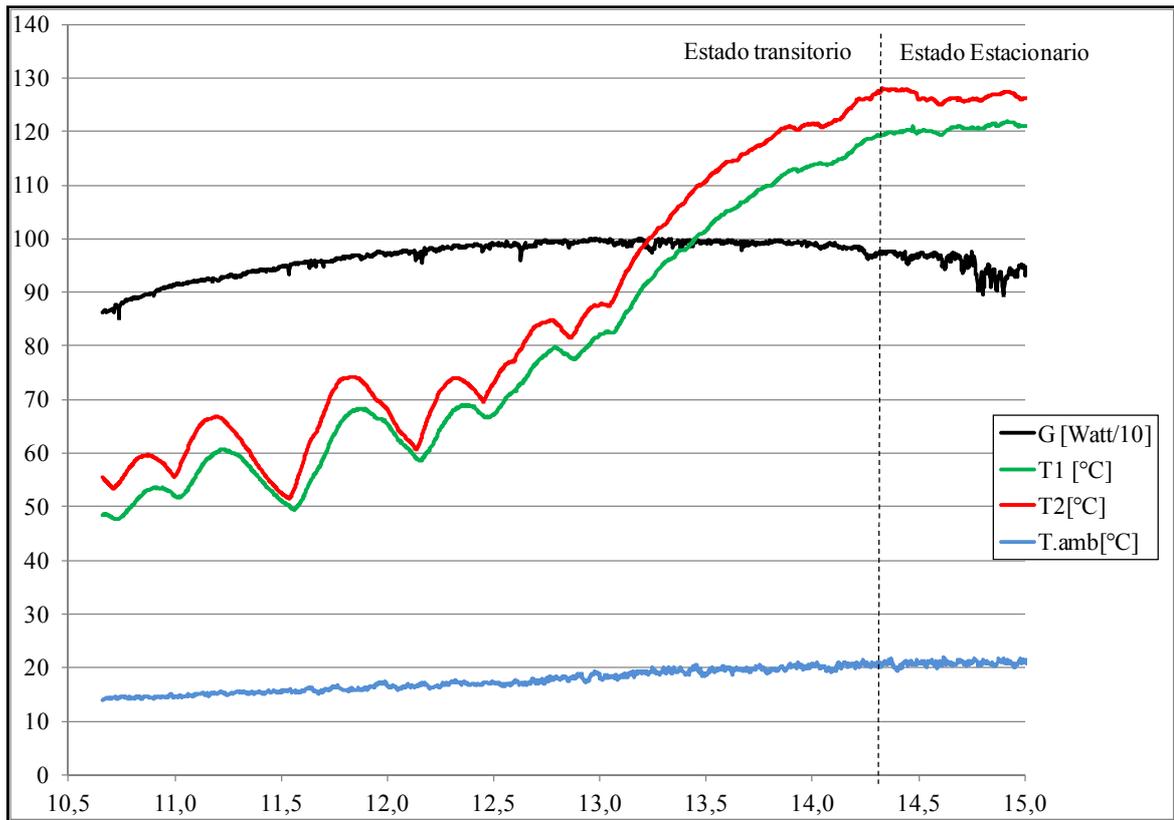


Figura 7. Evolución de temperaturas e irradiancia en función de la hora local.

Con el fin de determinar el rendimiento térmico global del sistema, se determinó el caudal de vapor generado. Para ello se colocó a la salida de vapor un condensador conectado a una probeta graduada, tal como se muestra en la Figura 8; así, pudo medirse el volumen de agua proveniente de la condensación de vapor en intervalos de tiempo.

El promedio de las mediciones arrojó un valor de caudal de vapor $\dot{m} = 0,63 \text{ kg/h}$. Con este dato y utilizando la radiación incidente promedio se obtuvo, por medio de la Ecuación 8, un rendimiento global del sistema $\eta = 16,4 \%$. Con la Ecuación 9 pudo obtenerse el rendimiento del circuito térmico siendo éste $\eta_{ct} = 80 \%$.

$$\eta = \frac{\dot{m}h_{fg}}{GA_a} \quad (8)$$

$$\eta_{ct} = \frac{\eta}{\eta_c} \quad (9)$$

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 la condiciones de trabajo.

Para el cálculo del área de transferencia de calor, se propuso un conjunto de ecuaciones de transferencia de calor y el uso de correlaciones adecuadas que permitieron alcanzar el resultado a

partir de estimar un rendimiento térmico del CCP y la temperatura del fluido en el ingreso del generador.



Figura 8. Vista del sistema de condensación para la determinación del caudal de vapor generado

El ensayo experimental realizado demostró que es posible la generación de vapor de agua de baja entalpía alcanzándose niveles de temperatura en el fluido térmico suficientes para lograr la ebullición del agua en el generador de vapor. Se considera que el bajo rendimiento térmico $\eta_c = 20,4 \%$ obtenido en el CCP puede deberse a pérdidas ópticas debido al envejecimiento y deterioro de la capacidad reflectante de la superficie parabólica, y a las propiedades ópticas del tubo receptor y su cobertura de vidrio. Por otra parte, el rendimiento del circuito térmico, $\eta_{ct} = 80 \%$, es un indicador de las pérdidas por disipación de calor en los equipos y accesorios del circuito.

Con el fin de analizar en qué manera puede mejorarse el rendimiento del sistema se planifica realizar ensayos modificando las variables de proceso y optimizando las variables ópticas que inciden en la eficiencia del concentrador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto y a la Secretaría de Políticas Universitarias dependiente del Ministerio de Educación de la

Nación que financió el proyecto a través del programa “Universidad, Diseño y Desarrollo Productivo” Edición 2016.

NOMENCLATURA

A_a = Área de apertura del concentrador [m^2]

$C_{p,l}$ = Calor específico del agua [$J/kg.K$]

$C_{p,th}$ = Calor específico del fluido térmico [$J/kg.K$]

$C_{s,f}$ = 0,013 Coeficiente para combinación agua –acero inoxidable [adimensional]

d_{ext} = Diámetro exterior de la serpentina [m]

d_{in} = Diámetro interior de la serpentina [m]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

G = Radiación incidente [W/m^2]

h_{fg} = Entalpía de vaporización del agua [J/kg]

h_{th} = Coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido térmico [W/m^2K]

k = Conductividad térmica del acero inoxidable [W/mK]

L = Longitud de la serpentina [m]

\dot{m} = Flujo másico de vapor [kg/s]

\dot{m}_{th} = Flujo másico del fluido térmico [kg/s]

n = 1 Coeficiente para combinación agua –acero inoxidable [adimensional]

Pr_l = Número de Prandtl del agua líquida [adimensional]

T_1 = Temperatura de entrada del fluido térmico en el tubo receptor [K]

T_2 = Temperatura de salida del fluido térmico del tubo receptor [K]

T_i = Temperatura de entrada del fluido térmico en la serpentina [K]

T_o = Temperatura de salida del fluido térmico de la serpentina [K]

\bar{T}_i = Temperatura media del fluido térmico en el interior de la serpentina [K]

T_s = Temperatura superficial [K]

T_{sat} = Temperatura de saturación del agua [K]

q = Potencia entregada al agua [W]

q''_s = Flujo de calor por unidad de superficie [W/m^2]

η = Rendimiento térmico global [adimensional]

η_c = Rendimiento térmico del concentrador [adimensional]

η_{ct} = Rendimiento del circuito térmico [adimensional]

μ_l = Viscosidad dinámica del agua [$Pa.s$]

ρ_l = Densidad del agua líquida [kg/m^3]

ρ_v = Densidad del vapor [kg/m^3]

σ = Tensión superficial del agua [N/m]

REFERENCIAS

- Akbarzadeh S., Valipour M. (2018). Heat Transfer Enhancement in Parabolic Trough Collectors: A Comprehensive Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 92 198-218
- Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.(2011). Fundamentals of heat and mass transfer 7th ed., John Wiley y 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 ASADES2015

- 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
- Fernández-García A., Rojas E., Pérez M., Silva R., Hernandez-Escobedo Q., Manzano-Agugliaro F. (2015). A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat. Journal of Cleaner Production 89, 272-285.
- Fernández-García A., Valenzuela L., Zarza E., Rojas E., Pérez M., Hernandez-Escobedo Q., Manzano-Agugliaro F. (2018) SMALL-SIZED parabolic-trough solar collectors: Development of a test loop and evaluation of testing conditions. Energy 152, 401-415
- Inventive Power. <http://inventivepower.com.mx> (Fecha de acceso: 14/08/2018).
- Plataforma Solar de Almería. <http://www.psa.es/es/projects/capsol/index.php> (Fecha de acceso: 14/08/2018)
- Tagle P., Agraz A., Rivera C. (2016). Study of applications of parabolic trough solar collector technology in Mexican industry. Energy Procedia 91, 661-667
- Weiss W. Rommel M. (2008). Process Heat Collectors. State of the Art within Task 33/IV. <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/iea/publications/iea-shc-process-heat-collectors-2008.php> (Fecha de acceso: 14/08/2018)

ABSTRACT

In this work the design, development and study of the performance of a thermal loop for steam generation of low enthalpy for industrial process heat is presented. A prototype of a parabolic trough collector is used with an aperture area of 2,5 m². The use of a thermal transfer fluid in a circuit that involves temperature resistant equipment and accessories which are available in the local market is proposed. In the steady state of the first tests carried out, the thermal fluid reached a maximum temperature of 128 °C at the collector output with an average temperature difference of 6 °C. The thermal efficiency of PTC was of 20,4 %. Steam flow generated in the steady state was of 0,63 kg/h which allows to infer an overall thermal efficiency of 16,4 %.

Keywords: solar energy, parabolic trough concentrator, thermal loop, steam production

ESTUDIO GEOMETRICO DE UN HORNO SOLAR PARA PROCESAMIENTO DE MINERALES A ALTAS TEMPERATURAS#

C. Placco, M. Gea, M. Bonini, E. Gutiérrez, C. Fernández, H. Suligoy

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta

e-mail: cplacco@gmail.com

Recibido 06/08/18, aceptado 18/09/18

RESUMEN: Se presenta un estudio óptico geométrico del campo de helióstatos de un horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas. La configuración propuesta tiene la particularidad de que tanto los helióstatos como el concentrador secundario tienen foco lineal para concentrar la radiación solar en un recinto térmico cilíndrico. Para la determinación de la eficiencia óptica geométrica del sistema se encontraron las ecuaciones de las posiciones angulares de los helióstatos para cada instante. Se obtuvo una herramienta computacional que permite evaluar la energía anual colectada para distintas geometrías del campo de colección y permite también encontrar la configuración que minimiza las pérdidas ópticas. Se realizó el diseño de los heliostatos mediante la asistencia del análisis de marcha de rayos. Se comprobó experimentalmente el grado de concentración lineal de las facetas que componen cada helióstato.

Palabras clave: energía solar térmica, horno solar, helióstato.

INTRODUCCIÓN

Para las empresas mineras de la Puna, localizadas lejos de la red de gasoductos, el desarrollo de sistemas productivos que involucren procesos térmicos se encuentra limitado debido al alto costo de transporte de los combustibles. A su vez, estas plantas están ubicadas en una de las regiones con mayor insolación del mundo, la Puna de Atacama, lo que hace que la energía solar sea el principal recurso energético local.

La empresa Ulex S.A. en su planta en la mina Sol de Mañana en el Departamento de Los Andes, provincia de Salta, construyó y ensayó un primer prototipo de horno solar. El mismo está formado por un conjunto de helióstatos (grandes espejos planos) que reflejan la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico, y éstos, a su vez, sobre un recinto térmico, donde se procesa el mineral a alta temperatura (Figura 1). La eficiencia de este equipo es baja debido a que se trata de un prototipo básico, con componentes artesanales y control manual. Sin embargo el sistema permitió probar que se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 500 °C, lo que permitió realizar las primeras experiencias de separación y concentración de colemanita (borato de calcio) mediante calcinación y decrepitación del mineral.

La comprobación de que es posible disponer de energía solar térmica para procesos industriales en la propia localización de la explotación, abre nuevas posibilidades de agregar valor económico a algunos minerales de importancia en la producción regional, como es el caso de algunos boratos y de la perlita. Los mismos poseen un alto contenido de agua en su estructura y cuando son calentados hasta altas temperaturas la liberan, mejorando sus propiedades desde el punto de vista comercial.

El trabajo presentado en este artículo se encuentra enmarcado en un proyecto que consiste en el desarrollo de la tecnología de horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas a través de la construcción y optimización de un prototipo de concentrador solar térmico.

Parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.



Figura 1: Primer prototipo de horno solar en la Puna salteña. Espejos planos reflejando la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico.

HORNO SOLAR

Los hornos solares pertenecen a la rama de los sistemas termosolares de concentración. Estos hacen posible la obtención de altas relaciones de concentración mediante el empleo de varias etapas, pudiendo así lograr temperaturas muy elevadas en el receptor, que se sitúa en el foco o en las proximidades de éste.

Normalmente están compuestos por uno o varios heliostatos, un concentrador secundario y un receptor térmico (Figura 2). Para la regulación de la radiación sobre el receptor suele emplearse un atenuador constituido por pantallas rebatibles.

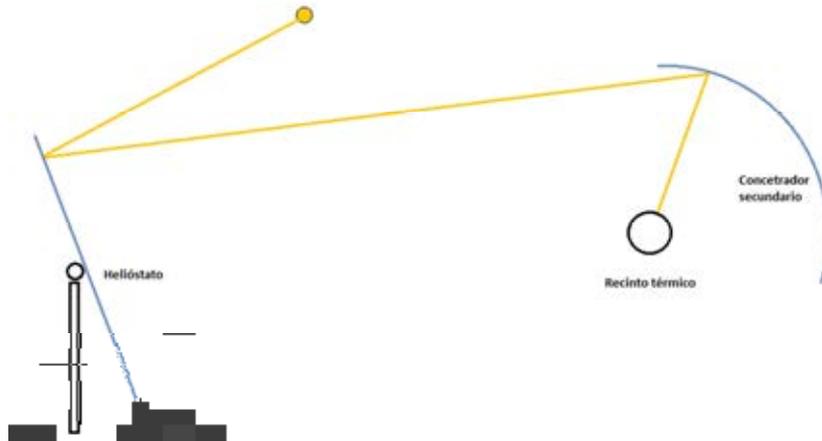


Figura 2: Esquema de un Horno Solar de alta temperatura

La tecnología de los hornos solares tiene sus inicios en la segunda mitad de la década de 1950. Las primeras investigaciones sobre hornos solares tenían como finalidad conocer el efecto de las altas temperaturas (aprox 3500°C) sobre diversas propiedades de materiales expuestos a flujos radiativos muy concentrados (Glaser 1957, 1958), como son conductividad térmica, coeficientes de dilatación, emisividad, puntos de fusión de diversos compuestos (Hisada, 1957), estudio de materiales ultrarrefractarios, obtención de diagramas de fase, crecimiento de cristales y purificación de materiales. Simultáneamente se han desarrollado métodos para medir altas temperaturas y técnicas para medir la densidad de radiación concentrada (Loh, 1957). Estas últimas han evolucionado y actualmente se utilizan técnicas de digitalización de imágenes usando cámaras CCD (Johnston, 1995) y técnicas calorimétricas como medida de referencia para las imágenes (Pérez Rábago, 2004).

Entre los primeros hornos se pueden mencionar el de Arizona State Collage en Estados Unidos de Norteamérica construido en 1956 y el de Instituto Gubernamental de Investigación Industrial, en Japón (Hisada, 1957). Posteriormente se construyeron hornos de mayor superficie de captación y con mayor capacidad de concentración, como el que se encuentra en el Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) en Odeillo, Francia, de 1000 kW térmicos (Trombe, 1973); el horno solar de Instituto Paul Scherrer (PSI) de aproximadamente 40 kW (Schubnell, 1991); el horno solar de la Academia de Ciencias de la Republica de Uzbekistán de 1000 kW (Abdukhamaranov, 1998); el horno del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en Colonia, Alemania de 20 kW (Neumann, 1999); el horno solar del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) en Colorado, USA de 10 kW y el horno del Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT) ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España de 45 kW. También existen desarrollos recientes orientados a actividades industriales como la cocción de tabiques de arcilla y la fabricación de cerámicos (Martínez Plaza et al., 2015).

En nuestro país se cuenta con el antecedente antes mencionado, mediante el cual se está ensayando el procesamiento térmico de boratos en la Puna salteña. El mismo tiene un desarrollo preliminar y desde el INENCO se ha comenzado a trabajar, a través de un convenio con la empresa, con el objetivo de optimizar esta tecnología. Se plantea el diseño y construcción de un nuevo prototipo industrial que tenga en cuenta la experiencia desarrollada por los técnicos de la minera. La particularidad del diseño de horno solar propuesto es que tanto los helióstatos como el concentrador secundario se diseñaron con un foco lineal. Esto se debe a que en los ensayos preliminares los minerales se procesaron en recintos cilíndricos rotativos que permiten la circulación y el tamizado de los mismos. También se plantea utilizar el sistema para calentar fluidos térmicos como aceites o sales fundidas para generalizar las aplicaciones del sistema, incluso para desarrollar equipos de acumulación térmica.

ESTUDIO GEOMÉTRICO

Existen aspectos del sistema helióstatos - reflector secundario, que requieren un estudio detallado de la óptica geométrica. Éstos tienen que ver con el diseño necesario para conseguir una razón de concentración adecuada, para la minimización de las pérdidas ópticas, para la construcción de un sistema de seguimiento solar, etc.. El análisis de la geometría solar y la marcha de rayos, asociados a un modelo de atenuación atmosférica, permite calcular la radiación directa que recibe cada espejo en función del tiempo teniendo en cuenta que estos giran alrededor de dos ejes.

Las relaciones básicas que permiten determinar las coordenadas angulares del sol para cualquier punto sobre la superficie terrestre son las siguientes (Duffie and Beckman, 2006):

$$\delta = 23,45 \text{ sen } (360 (284 + n) / 365) \quad 1)$$

$$\Theta_z = \text{arc cos } (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta) \quad (2)$$

$$\gamma_s = \text{sign } (\omega) \text{ arc cos } (\cos \Theta_z \text{ sen } \varphi - \text{sen } \delta) / \text{sen } \Theta_z \cos \varphi \quad (3)$$

δ : ángulo de declinación solar

n : número de día del año

Θ_z : ángulo cenital, es el ángulo que forman la radiación directa y la vertical del lugar.

φ : latitud del lugar

ω : ángulo horario (desplazamiento angular del sol debido a la rotación de la tierra)

γ_s azimut solar, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la radiación directa con el meridiano del lugar.

En la figura 3 se representan las direcciones de incidencia y reflexión de la radiación solar respecto a un sistema de ejes definido de manera que la normal de la superficie del helióstato está contenida en el plano y-z. Es decir, la dirección del eje y coincide con la dirección de la proyección horizontal de la normal al plano. Este eje forma un ángulo azimutal γ_p respecto al meridiano del lugar. En el esquema 3-a está representada la proyección de un rayo incidente sobre el plano y-z.

Los ángulos son los siguientes:

α_{sol} : ángulo entre el azimut del sol y el azimut del heliostato ($\gamma_s - \gamma_p$).

h_{sol} : altura solar, ángulo que forma la dirección del sol respecto al plano horizontal ($90 - \Theta_z$).

h'_{sol} : proyección de la dirección de un rayo incidente sobre el plano y-z.

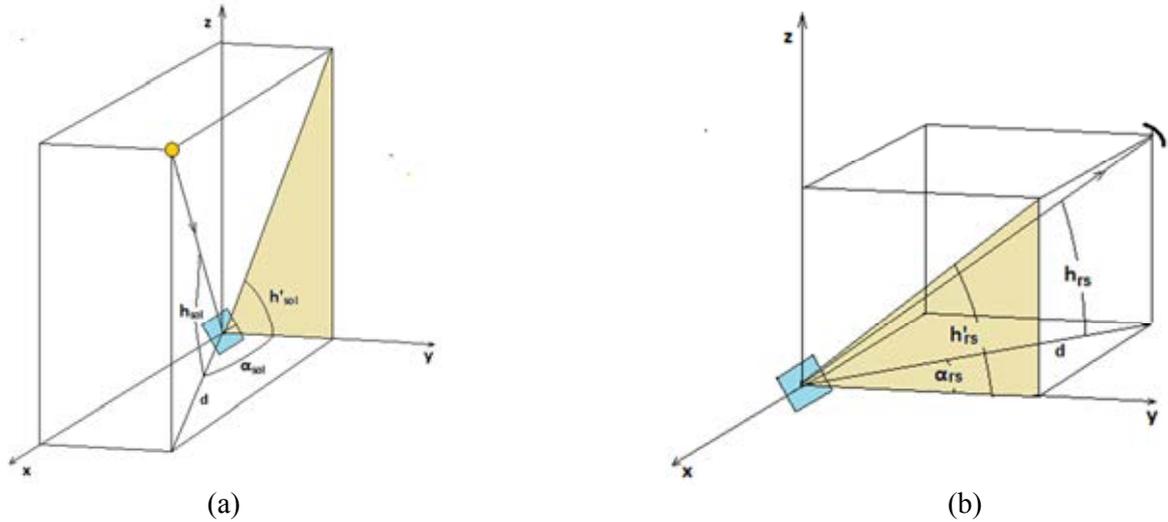


Figura 3: Proyecciones sobre el plano normal al heliostato: a) de un rayo incidente, b) de un rayo reflejado

Se puede observar en dicho esquema que para una dada posición del sol (x,y,z), se cumple que:

$$z = y \operatorname{tg}(h'_{sol}) = d \operatorname{tg}(h_{sol}) \quad (4)$$

$$y = d \cos(\alpha_{sol}) \quad (5)$$

$$h'_{sol} = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(\operatorname{tg}(h_{sol}) / \cos(\alpha_{sol})) \quad (6)$$

En el esquema 3-b está representada la proyección de un rayo reflejado hacia el reflector secundario sobre el plano y-z, cuya dirección respecto al heliostato es γ_{rs} (figura 4).

α_{rs} : ángulo entre el azimut del reflector secundario y el azimut del heliostato ($\gamma_{rs} - \gamma_p$).

h_{rs} : ángulo que forma la dirección del secundario respecto al heliostato y el plano horizontal.

h'_{rs} : proyección de la dirección de un rayo reflejado sobre el plano y-z.

Análogamente al caso de la incidencia, en la reflexión se puede plantear que:

$$z = y \operatorname{tg}(h'_{rs}) = d \operatorname{tg}(h_{rs}) \quad (7)$$

$$y = d \cos(\alpha_{rs}) \quad (8)$$

$$h'_{rs} = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(\operatorname{tg}(h_{rs}) / \cos(\alpha_{rs})) \quad (9)$$

Planteando la condición de que la dirección de la normal al plano es bisectriz entre los rayos incidentes y reflejados, se puede obtener el ángulo de inclinación del heliostato β :

$$\beta = (h'_{sol} + h'_{rs}) / 2 \quad (10)$$

En cuanto al cálculo del azimut del plano, se debe tener en cuenta que éste debe ser bisectriz entre el azimut del sol y la dirección de la proyección horizontal de la línea que une el heliostato con el reflector secundario (figura 4):

$$\gamma_p = (\gamma_s + \gamma_{rs}) / 2 \quad (11)$$

La determinación de los valores que deben tomar en cada instante los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada helióstato para reflejar la radiación solar a un punto fijo (reflector secundario), en su movimiento de seguimiento al sol durante el día, para cualquier época del año se puede realizar con la siguiente secuencia de cálculo:

- Cálculo del ángulo de declinación solar para un determinado día del año con la ecuación (1)
- Cálculo del ángulo cenital Θ_z una vez definidos n , la latitud del lugar y el momento del día con la ecuación (2).
- Cálculo del azimut solar γ_s con la ecuación (3).
- Determinación de las coordenadas angulares del reflector secundario respecto del helióstato en estudio γ_{rs} y h_{rs}
- Cálculo de la inclinación β con las ecuaciones de (6), (9) y (10)
- Cálculo del azimut del plano γ_p con la ecuación (11)

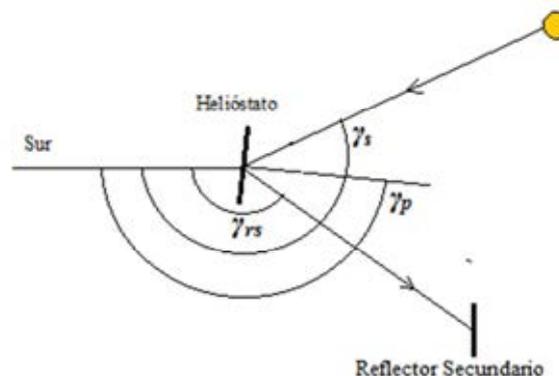


Figura 4: Proyección en planta - ángulos azimutales

RADIACIÓN DISPONIBLE EN EL RECEPTOR DEL SISTEMA

Atenuación atmosférica

La radiación solar disponible en determinado lugar sobre la superficie de la tierra depende de factores astronómicos, geográficos, geométricos, físicos y meteorológicos. Los factores astronómicos están relacionados con la constante solar, la declinación solar, el ángulo horario y horas de sol. Los factores geográficos dependen de la latitud, longitud y altitud del sitio. Los factores geométricos son una función de la inclinación de la superficie y de su ángulo azimutal. Los factores físicos están relacionados con el contenido de vapor de agua en la atmósfera, la dispersión por moléculas de aire y gases miscibles, la presencia de aerosoles y el efecto del ozono. Los factores meteorológicos están relacionados con la temperatura, la precipitación, la humedad, etc.. Los dos últimos son los grupos más difíciles de cuantificar, ya que varían continuamente, y generan incertidumbre para establecer con precisión la energía incidente en la superficie de la Tierra en periodos específicos de tiempo.

A partir de 1940 se desarrollaron distintos modelos analíticos para el cálculo de la radiación solar, que fueron creciendo en precisión y complejidad. Entre ellos el modelos de Moon, Reddy, ASHRAE, Lacis & Hansen, Hottel, Atwater & BallDavis & Hay, Hoyts y Watts (Gutiérrez-Trashorrasa et al., 2018). El modelo no espectral Bird & Hulstrom es más completo y preciso que los modelos anteriores y es el que se utiliza para el cálculo de la radiación en el presente trabajo. Aunque este modelo permite determinar radiación directa y difusa, a fines de evaluar el sistema de concentración se enfoca el cálculo sólo en la directa (Bird & Hulstrom, 1981).

$$I_d = 0.9662 C_r \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad (12)$$

Donde: 0.9662 es un factor de corrección que ajusta el rango de longitud de onda del espectro solar (0,3–3 μm).

C_r : Valor de la constante solar diaria (W/m^2).

τ_r : Transmitancia por scattering en moléculas de aire.

τ_o : Transmitancia debido a la absorción del ozono (O_3).

τ_g : Transmitancia debido a absorción de una mezcla uniforme de gases (CO_2 y O_2).

τ_w : Transmitancia debido a la absorción en vapor de agua.

τ_a : Transmitancia por absorción y scattering por la presencia de aerosoles.

La constante solar diaria y las distintas transmitancias son determinadas por ecuaciones. Las transmitancias dependen de la masa de aire, y según su tipo, del espesor de la capa de ozono, de la cantidad de agua precipitable y de la turbidez atmosférica (Bird & Hulstrom, 1981).

Pérdidas óptico geométricas

Las pérdidas óptico geométricas dependen de la posición relativa de los helióstatos en torno al absorbedor y de la posición del sol. Por este motivo dependen fuertemente del instante y del diseño del conjunto solar. Estas pérdidas vienen determinadas por los siguientes factores:

Efecto coseno

Cuantifica las pérdidas causadas por la inclinación del eje óptico del helióstato con respecto a la trayectoria de los rayos solares, lo que se traduce en una reducción del área visible proyectada por el sol. Estas pérdidas son proporcionales al coseno del ángulo que forman la normal a la superficie reflectiva con la dirección de incidencia de la radiación directa. Para cada helióstato y cada instante del año se tendrá un factor coseno determinado. El hecho de que la dirección de la radiación reflejada sea propia de cada helióstato, y fija para todo instante, determina que ante una dirección de la radiación incidente idéntica para todos los helióstatos de un campo solar, el factor coseno de cada uno sea diferente.

Pérdidas por sombras y bloqueo

Las pérdidas por sombras engloban tanto las producidas por las sombras que unos helióstatos proyectan sobre otros, como la proyectada por cualquier otro elemento sobre los helióstatos. Causan una reducción del área útil reflectiva y también son función de la posición del sol y, por tanto, de la hora del día para cada día del año. Las pérdidas por bloqueos corresponden a la fracción de radiación solar reflejada por los helióstatos que no alcanza el receptor al resultar bloqueada por helióstatos vecinos. Como en los casos anteriores, este efecto también depende del instante considerado.

Pérdidas por reflectancia

Las pérdidas por reflectancia se deben a que los helióstatos no reflejan de forma especular la totalidad de la radiación solar que incide sobre su superficie reflectante, ya que por un lado, parte de dicha radiación es absorbida por el vidrio, y por otro lado una fracción de la radiación incidente será reflejada de forma difusa por los espejos. Dependen del espesor y de la calidad del vidrio y crecen con el aumento del ángulo de incidencia de la radiación respecto a la normal al plano.

Pérdidas por desbordamiento de flujo:

El desbordamiento de flujo consiste en la fracción de la radiación reflejada por el campo de helióstatos que no alcanza la superficie absorbente, debido a errores ópticos. Éstas son cuantificadas con el denominado factor de desbordamiento, que son consecuencia de los errores en el seguimiento del movimiento del sol y de los errores de pendiente de los helióstatos. Sus efectos dependen de la posición relativa entre el sol, el heliostato y el receptor.

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA CONFIGURACIÓN DE HELIÓSTATOS

Se desarrolló un programa de cálculo que, a partir de una determinada configuración de un sistema de helióstatos y su ubicación geográfica, permite calcular la radiación incidente en el recinto térmico.

El software utiliza las ecuaciones obtenidas en el estudio geométrico descrito precedentemente y el modelo de Bird de atenuación atmosférica para realizar el cálculo de la radiación solar directa que llega en cada instante al plano de los helióstatos. Cuantifica las pérdidas geométricas por efecto coseno y por reflectancia. Para la determinación de estas últimas se utilizaron las correlaciones entre la reflectancia especular y el ángulo de incidencia, obtenidas en estudios anteriores para vidrios similares (Hongn, et al., 2011).

El cómputo se inicia a partir de la selección del lugar geográfico de emplazamiento, sus características atmosféricas (presión atmosférica, vapor de agua, presencia de aerosoles, etc.). Requiere de un

prediseño del campo de heliostatos de los cuales se conoce el número, el área y las coordenadas de cada uno respecto al receptor y las características del material reflectante (espesor y tipo de vidrio). La configuración geométrica tiene asociada ángulo de apertura ψ , medido entre el eje del absorbedor y los colectores como se muestra en la figura 5.

El programa determina la posición del sol a intervalos de seis minutos, durante todos los días del año. De acuerdo a la configuración geométrica del sistema, realiza el cálculo de la posición angular instantánea del plano de cada uno de los heliostatos (inclinación β y azimut del plano γ_p) y valora las pérdidas por efecto coseno y por reflectividad para determinar una eficiencia óptica. Las pérdidas por bloqueo y sombreado deben ser minimizadas en el prediseño del campo de heliostatos (se considera una eficiencia de 0,95) y las pérdidas por desbordamiento se estiman de acuerdo a experiencias anteriores, considerando que los errores ópticos alcanzan el 5%. A partir de la radiación extraterrestre afectada por la atenuación atmosférica, y las pérdidas óptico geométricas se obtiene la irradiancia reflejada por cada uno de los heliostatos, e integrada en el tiempo la energía anual.

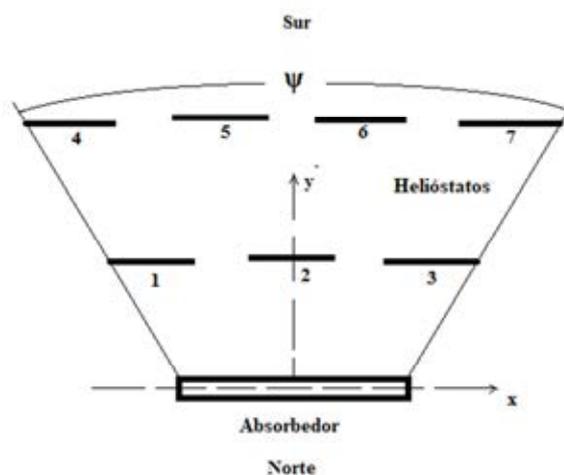


Figura 5: Configuración del campo de heliostatos.

El programa realiza las operaciones de forma matricial, independientemente del número de elementos que componen el campo de reflectores, lo cual facilita la comparación entre sistemas diseñados con distinta cantidad de heliostatos, sólo ingresando sus posiciones respecto al recinto térmico.

La salida del software proporciona el ángulo de apertura del sistema, la energía anual que recibe el recinto térmico, un archivo con los datos de: día, hora, eficiencia óptica y potencia instantánea por heliostato para todos los días del año con diez valores por hora y otro archivo con idénticos datos para los días medios de cada mes.

Comparando los resultados del cálculo de la energía anual colectada para distintas configuraciones con diferentes ángulos de apertura ψ y altura del receptor es posible encontrar aquella en la que la energía es máxima.

Con el objetivo de evaluar la influencia de las pérdidas geométricas para distintas configuraciones, se consideró un prediseño de campo solar de acuerdo al proyecto de prototipo a instalar en la Mina Sol de Mañana. Este está constituido por 3 heliostatos cuadrados, de aproximadamente 3 m de lado, sumando un área de 25,2 m² de espejos comunes de 3 mm de espesor. El receptor se encuentra a 5 m de altura y los centros de los heliostatos, que corresponden a los números 1, 2 y 3 del esquema de la figura 5, tienen las siguientes coordenadas en el plano x-y (Tabla 1).

Heliostato 1		Heliostato 2		Heliostato 3	
x	y	x	y	x	y
-5 m	10 m	0	11 m	5 m	10 m

Tabla 1: Coordenadas del campo solar

Con esta configuración se calculó la variación diaria de la energía reflejada y del rendimiento óptico. Como ejemplo se presentan en la Figura 6 las gráficas correspondientes al día 21 de junio. En ellas se

puede apreciar la influencia del efecto coseno observando las curvas de la radiación solar reflejada por los heliostatos que están fuera del eje de simetría. El Heliostato N°1 colecta más radiación durante la mañana que durante la tarde, e inversamente lo hace el Heliostato N° 3. Lo mismo se observa en las gráficas de la eficiencia óptica.

Mediante la aplicación del programa de cálculo desarrollado también se puede analizar la influencia del valor del ángulo de apertura ψ y de la altura del receptor en la energía colectada en un año (Figura 7).

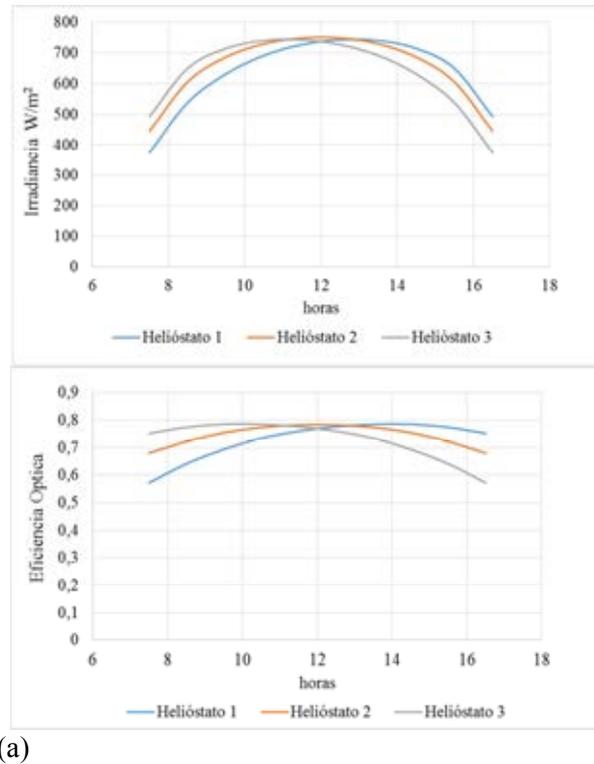


Figura 6: Radiación reflejada (a) y eficiencia óptica (b) de cada heliostato para el día 21 de junio

Se observa que, para un dado número de heliostatos, mientras mayor es el ángulo de apertura del campo solar, menor es la radiación reflejada calculada para todo el año. Esto se debe a la creciente incidencia del efecto coseno y, en menor medida, de la pérdida de reflectancia de los espejos al aumentar el ángulo de incidencia de la radiación. Esta pérdida se acentúa en los heliostatos más alejados del eje y durante las primeras y últimas horas del día. Respecto a la influencia de la altura del receptor, se observa en la figura que existe una altura para la cual es máxima la captación de energía anual que corresponde a la minimización del efecto coseno.

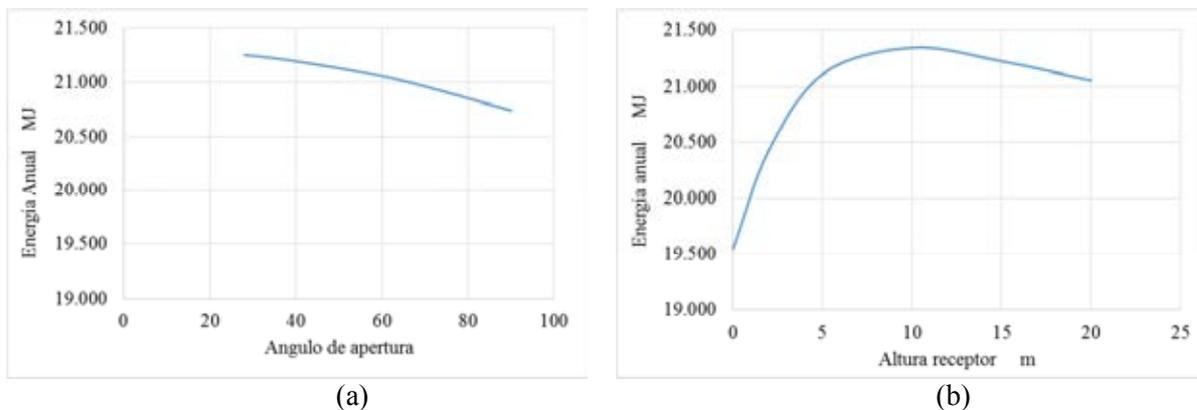


Figura 7: Energía anual colectada por los heliostatos en función del ángulo de apertura (a) y de la altura del receptor (b)

CONSTRUCCIÓN Y ESTUDIO GEOMÉTRICO DEL HELIÓSTATO

A fin de comenzar a desarrollar un prototipo industrial para la transferencia de tecnología, se plantea la construcción y análisis de un helióstato cuadrado de 3 m de lado, constituido por 8 facetas (figura 8-a). Tanto los marcos externos como los bastidores de las facetas fueron construidos con caño estructural. Cada faceta está vinculada a la estructura del helióstato mediante cuatro tornillos regulables que permiten dar una orientación distinta a cada una para lograr un grado de concentración inicial (canteo). A su vez, el espejo de cada faceta tiene en su parte posterior un mecanismo de deformación por flexión controlada para conformar una imagen lineal sobre el receptor (figura 8-b).

Análisis mediante traza de rayos:

Para estudiar el comportamiento teórico de este diseño se utilizó un software de geometría que posibilita analizar el sistema mediante traza de rayos. El programa permite obtener valores de configuración del canteo y deformación lineal de los espejos con los cuales se logra una concentración de rayos máxima para cada posición y para cualquier ángulo de incidencia de la radiación. En la práctica, tanto el canteo como la deformación cilíndrica del espejo se realizan una sola vez, calibrando cada helióstato a una hora determinada. Durante el resto de las horas de funcionamiento la mancha de radiación solar concentrada sobre el receptor cambia mínimamente su tamaño, manteniéndose dentro del ángulo de aceptación de un concentrador secundario.

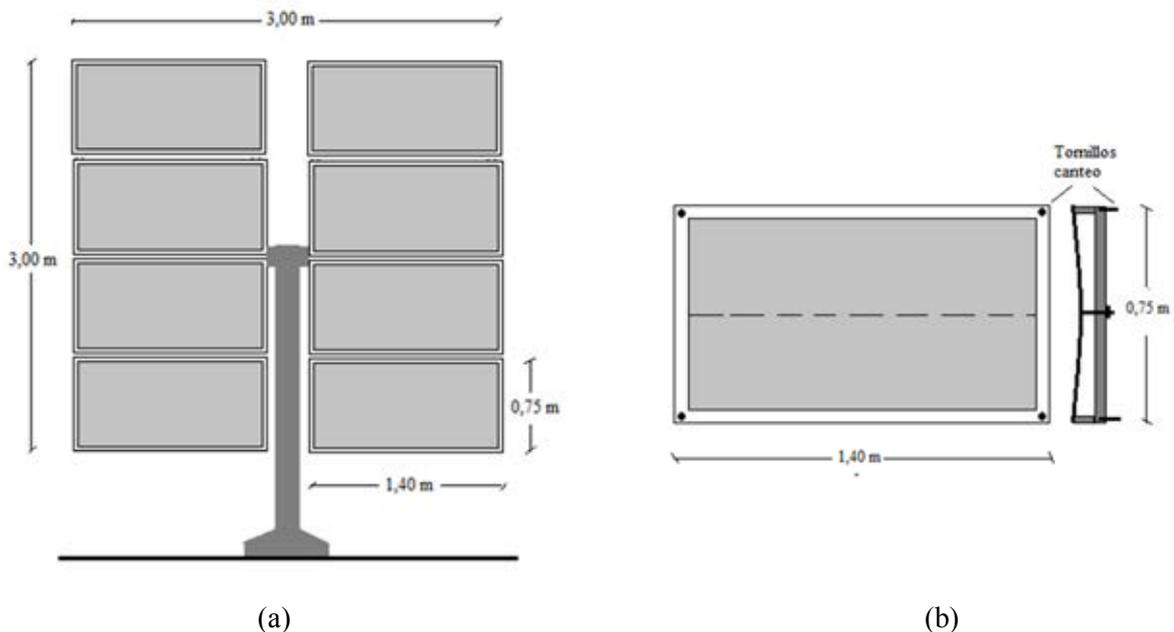
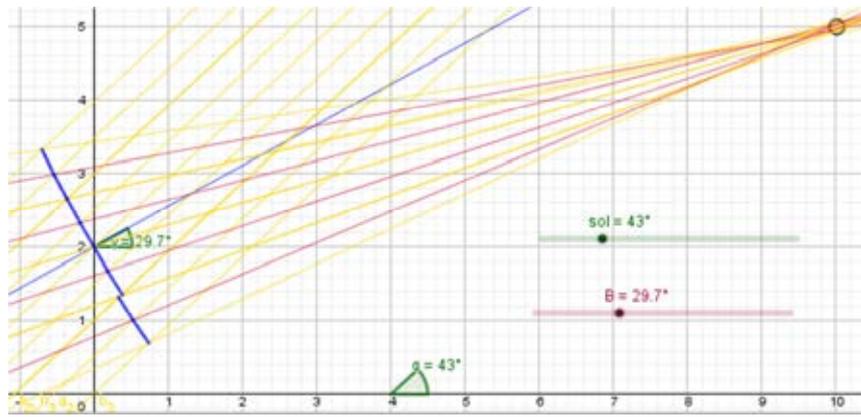


Figura 8: a) Esquema del helióstato de 8 facetas. b) Sistema de canteo de facetas y flexión de espejos (en corte)

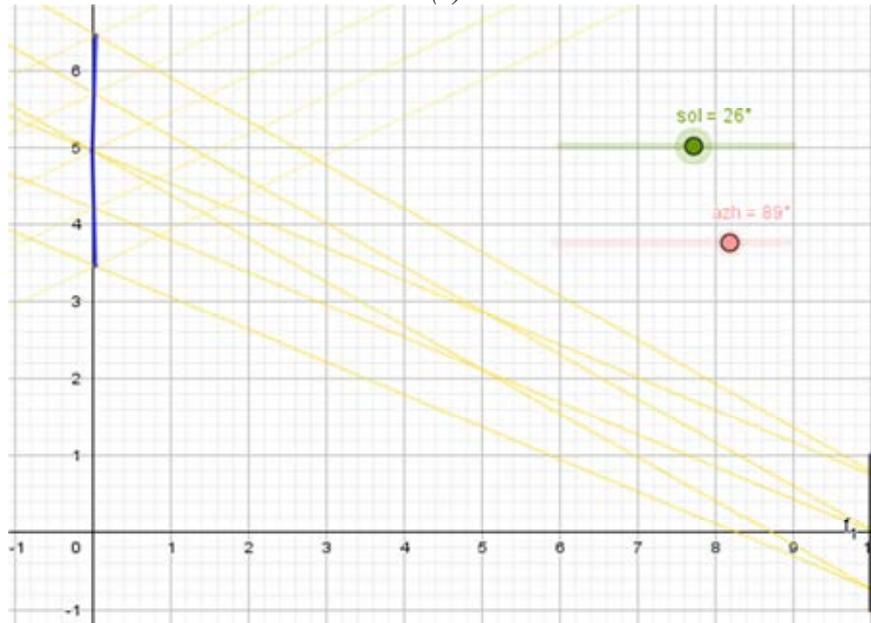
Comprobación experimental:

Para iniciar el estudio experimental del helióstato, se construyeron el marco estructural y los 8 bastidores de las facetas con sus respectivos tornillos para canteo, con las medidas indicadas en la Figura 8. Se completó una de las facetas con el pegado de un espejo de 3 mm de espesor y la construcción del sistema de deformación por flexión, que genera la concentración de rayos, *non image*, en un foco lineal. Se instaló la mitad de la estructura sobre una plataforma que permite las rotaciones alrededor de los ejes horizontal y vertical, a fin de realizar el enfoque de manera manual (Figura 10).

Se realizó un primer ensayo con el objeto de evaluar la variación del tamaño de la imagen generada por la faceta para distintas horas del día. Para ello se configuró la faceta de manera que forme una mancha solar sobre una pantalla para una hora determinada (12:00 hora solar). Esto se realizó fijando los tornillos del canteo y produciendo una flexión controlada del espejo modificando la flecha de la deformación con los tornillos posteriores hasta lograr un ancho mínimo de la imagen lineal sobre la pantalla. Manteniendo fija esta configuración, al día siguiente se realizaron los enfoques correspondientes a las horas 9:00, 10:00, 11:00 y 12:00 obteniéndose las imágenes presentadas en la Figura 11.



(a)



(b)

Figura 9: Proyección de los rayos para el helióstato N° 3, a) en el plano x-z, b) en el plano x-y

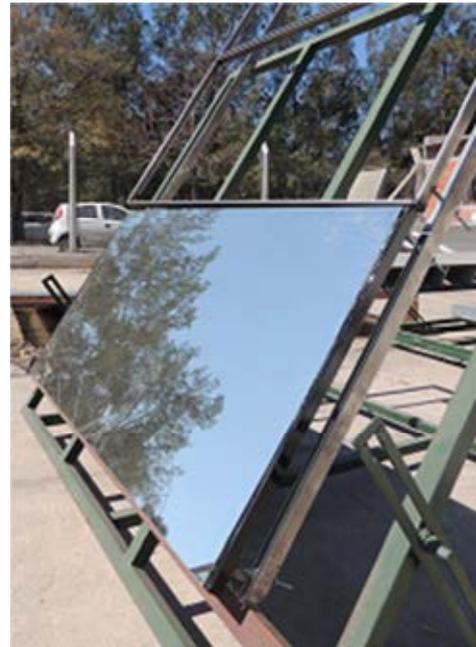


Figura 10: Fotografías de la estructura del helióstato y de una faceta.

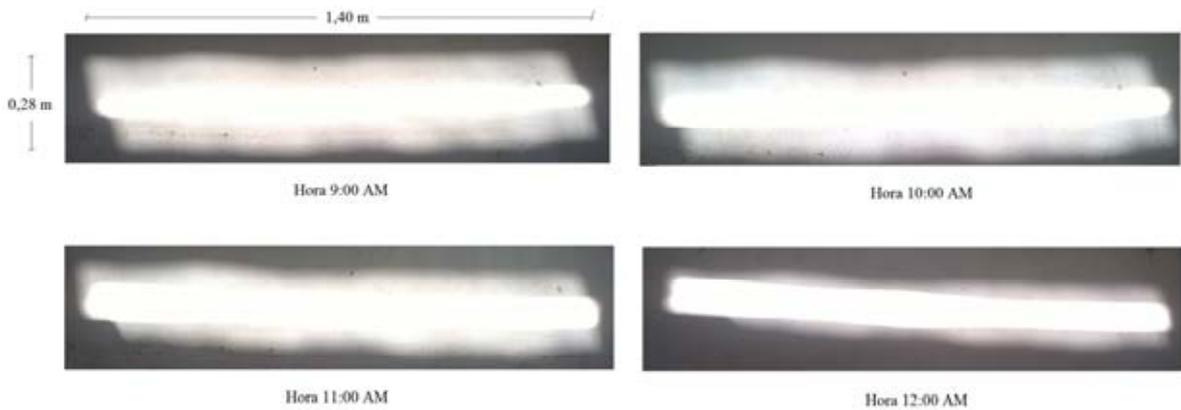


Figura 11: Secuencia de imágenes de la radiación concentrada por una faceta

Las imágenes obtenidas nos permiten realizar un análisis cualitativo, observando que el ancho de la mancha solar de concentración lineal se mantiene aproximadamente constante, con una marcada disminución del mismo a las 12:00, hora para la cual está calibrado el sistema. En cada imagen se observa que en la zona central la concentración es alta y disminuye hacia los bordes. Esto se explica en el hecho que la curvatura del espejo, generada por una fuerza distribuida en el eje longitudinal, corresponde matemáticamente a un polinomio de tercer grado (Gea et al., 2007). La mayor concentración de rayos ocurre en las proximidades del eje donde las diferencias entre las curvas de segundo y tercer grado son mínimas.

CONCLUSIONES

Este trabajo constituye el primer avance en el desarrollo de un prototipo de horno solar destinado a dar respuesta a una demanda concreta de una empresa productora de boratos. Se obtuvieron los primeros resultados, tanto en aspectos conceptuales como experimentales orientados a la aplicación específica, los cuales se destacan a continuación.

Se encontraron las ecuaciones que permiten determinar los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada heliostato para cada instante. Conociendo estos ángulos es posible calcular el ángulo de incidencia de la radiación sobre cada plano en cada instante y con él determinar las pérdidas óptico geométricas del sistema.

Para la evaluación de la energía que puede coleccionar un campo de heliostatos y la estimación de su eficiencia óptica se desarrolló un programa computacional. Se obtuvo una herramienta adecuada para evaluar distintas geometrías del sistema y encontrar la configuración que minimice las pérdidas ópticas. Este programa es una herramienta valiosa que permite el diseño y dimensionado de un campo de heliostatos de un horno solar.

El análisis mediante traza de rayos y los estudios experimentales iniciales permitieron comprobar el buen funcionamiento de los sistemas de calibración de la concentración generada por un heliostato. Se probaron los mecanismos de canteo de facetas y de flexión de espejos. Este último posibilita desarrollar un sistema novedoso de heliostatos con concentración en foco lineal.

Como trabajo futuro, se prevé la culminación del montaje y calibración de un heliostato con sus ocho facetas; con base en nuevos estudios experimentales de la mancha solar se diseñará el concentrador secundario. Se realizará el estudio teórico y experimental del comportamiento térmico del sistema en su conjunto.

REFERENCIAS

- Abdukhamaranov A. A. Akbarov R.Y. Gulamov K.G. et al. "Operating Experience of a Big Solar Furnace 1000 kW in Power" *Applied Solar Energy*, vol. 34, No. 1, 1998.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3ª edición. Wiley Interscience, New York.
- Gea M., Saravia L., Fernández C., Caso R. y Echazú R. "Concentrador Lineal Fresnel para la Generación Directa de Vapor de Agua" *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 11, 2007. ISSN 0329-5184
- Glaser, Peter E. "A solar furnace for use in applied research". *Solar Energy*, vol. 1, Issues 2-3, pp. 63-67, April-July, 1957.
- Glaser, Peter E. "Engineering research with a solar furnace" *Solar Energy*, vol. 2, Issues 2, pp. 7- 10, April 1958
- Gutiérrez Trashorras A., Villicaña Ortiz E, Álvarez A., González Caballín J., Xibert Bernat J., Suarez López M.. "Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) 93–106.
- Hisada T., Mii H., Noguchi C., Noguchi T., Hukuo N., and Mizuno M. "Concentration of the Solar Radiation in a Solar Furnace" *Solar Energy*. Vol. 1, No. 4, pp 14-18, 1957.
- Hongn M., Flores Larsen S., Altamirano M., Gea M., Saravia L. "Estudio de Reflectancia de Espejos para un Concentrador Solar Fresnel Lineal". *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Johnston, G. Flux "Mapping the 400m² 'Big Dish' at the Australian National University". *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 117, No. 4, pp 290-293, 1995.
- Loh, Eugene et al. "Heat flux measurements at the sun image of the California institute of technology lens-type solar furnace" *Solar Energy*, vol. 1, Issues 4, pp. 23-26, October 1957.
- Martínez Plaza D., Cañadas Martínez I., Mallol Gasch G., Téllez Sufrategui F., Rodríguez García J. . "A case study of the feasibility of using solar concentrating technologies for manufacturing ceramics". *Journal of Cleaner Production* 87 (2015) 977e991.
- Neumann, A. and Witzke, A. "The influence of sunshape on the DLR solar furnace beam" *Solar Energy*, vol. 66, Issues 6, pp. 447-457, 1999.
- Pérez Rábago, C.A., Marcos, M.J., Romero, M., Estrada, C.A.. "Heat Transfer in a Conical Cavity Calorimeter to Measure the thermal Power of a Point Focus Concentrator". *EUROSUN 2004*, Freiburg, Germany. June 20-23, 2004.
- Schubnell, M. "Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators" *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 113, pp. 112-116, May 1991. SERI/TR-642-761. February 1981. A Simplified Clear Sky. Model for Direct and. Diffuse Insolation on. Horizontal Surfaces. Richard E. Bird. Roland L. Hulstrom.
- Trombe, F. & Le Phat Vinh, A.. "Thousand kW Solar Furnace, Built by the National Center of Scientific Research, in Odeillo (France)" *Solar Energy*, vol. 15, pp. 57-61, 1973.

ABSTRACT:

A geometric optical study of the heliostat field of a solar furnace for the processing of minerals at high temperatures is presented. The proposed configuration has the particularity that both the heliostats and the secondary concentrator have a linear focus to concentrate the solar radiation in a cylindrical thermal enclosure. For the determination of the geometric optical efficiency of the system, the equations of the instantaneous angular positions of the heliostats were found. A computational tool was obtained that allows to evaluate the collected annual energy for different geometries of the collection field and also allows to find the configuration that minimizes the optical losses. The design of the heliostats was carried out by the assistance of the analysis of ray tracing. The degree of linear concentration of the facets that make up each heliostat was checked experimentally.

Keywords: solar thermal energy, solar furnace, heliostat.

NUEVO CALENTADOR SOLAR DE AIRE CON MATRIZ POROSA SELECTIVA. DESARROLLO TECNOLÓGICO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

F. López y A. Hernández¹

Instituto 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.lopez129@gmail.com

Recibido 11/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: En este trabajo se presenta el desarrollo y evaluación termo-energética de un nuevo prototipo de colector solar calentador de aire que posee como elemento absorbedor una matriz porosa de acero reciclado. El factor de huecos o porosidad de la matriz es del 96 %. El colector fue ensayado en la ciudad Salta, con flujo forzado a circuito abierto y pendiente de 40° bajo condiciones meteorológicas invernales. El salto térmico medio entre las temperaturas de entrada y salida del colector fue de 16,2 °C, 19 °C y 21 °C, para tres flujos máscicos ensayados: 0,065 Kg/s, 0,051 Kg/s y 0,043 Kg/s respectivamente. Experimentalmente se obtuvieron las curvas de eficiencia térmica instantánea presentando valores máxicos de 64 %, 55,4 %, y 55,0 %, para los tres flujos ensayados respectivamente. Estos valores indican una muy buena performance termo-energética del prototipo presentado en este trabajo y la conveniencia de operarlo con un flujo máscico superior a 0,05 Kg/s.

Palabras clave: colector solar, matriz porosa, monitoreo y simulación.

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles cubren el 80 % de la demanda mundial actual de energía primaria y son responsables de grandes emisiones de gases de efecto invernaderos. En la última década el uso de energías renovables para la producción de electricidad y calor ha tenido un crecimiento importante a nivel mundial como fuentes de energía no contaminantes y de larga disponibilidad. Este crecimiento se debe a varios factores: mejora de las tecnologías constructivas, iniciativas políticas de fomento, mejor acceso a la financiación e incremento en la concientización sobre el cuidado del medio ambiente.

Argentina es una de las economías más importantes de latinoamericana (MinEM). Pero se ha quedado atrás de otros países de la región en términos de generación de energías limpias (KPGM, 2016). Las energías renovables representan apenas un 1,9 % de su matriz energética nacional, de la cual el 60 % corresponde a los hidrocarburos (el gas natural representa el 49 %).

En los últimos años el gobierno nacional se ha mostrado interesado en el desarrollo y aplicación de la tecnología de energías no convencionales. Por ejemplo, en 2015, el gobierno promulgó la Ley 27.191 para promover la generación eléctrica a partir de fuentes renovables, con el objetivo de que la generación de energía limpia alcance el 8 % a finales de 2017 y el 20 % a fines de 2025.

Los colectores calentadores de aire son una buena alternativa para el aprovechamiento de la energía solar dado que se trata de una tecnología de bajo costo y mantenimiento. Son utilizados ampliamente para aplicaciones de baja a moderada temperatura, como calefacción de espacios, secado de productos agrícolas y de madera y otras aplicaciones industriales. En la actualidad, existen muchos diseños diferenciados por el tipo de absorbedor y por como circula el aire en su interior (Hernández y Quiñonez, 2017; Singh et al., 2014).

¹ Investigador Independiente de CONICET

A fin de aumentar la eficiencia térmica del colector, la superficie absorbadora de radiación solar debe cumplir con los siguientes requisitos: a) tener mucha área expuesta al fluido caloportador para maximizar la transferencia de calor y b) tener alta absorptancia solar y baja emitancia IR para maximizar la absorción solar y disminuir las pérdidas de calor hacia el ambiente exterior. La primera condición se logra empleando superficies corrugadas, con aletas, baffles o matrices porosas y la segunda mediante un tratamiento superficial selectivo caliente (Chamoli et al., 2012). Por otra parte, se puede aumentar la eficiencia térmica del colector trabajando con flujos másicos altos y haciendo circular el aire en contacto con ambas caras de la superficie absorbadora, en doble flujo paralelo o en doble paso a contracorriente.

Una alternativa muy conveniente es la de utilizar, como material absorbente, una matriz porosa expuesta directamente al sol. Las ventajas principales de esta tecnología son, por un lado, el incremento del área de transferencia de calor entre el absorbedor y el aire y por el otro, el aumento del coeficiente de transferencia de calor convectivo debido al incremento de la turbulencia generada en el flujo por las hebras de la matriz (Hernández et al., 2015).

Sopain et al. (2009) evaluaron la eficiencia térmica de colectores solares calentadores de aire de doble paso con y sin medio poroso y concluyeron que la eficiencia con medios porosos es aproximadamente 10 % mayor que sin él. También informaron que la eficiencia típica de este tipo de colectores está entre el 60-70 %. El aumento del rendimiento de estos tipos de calentadores de aire depende de los parámetros geométricos de la malla de alambre (Turk y Dursun, 2005).

En este trabajo se presenta el diseño y evaluación termo-energética de un nuevo prototipo de colector solar calentador de aire cuyo medio absorbedor es una matriz porosa selectiva caliente construida con viruta de acero reciclada para ser empleado, fundamentalmente, en la calefacción de viviendas de interés social, pudiéndose utilizar en cualquier otro tipo de edificios.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El colector solar calentador de aire desarrollado corresponde a la tipología de flujo en paso simple con medio poroso como absorbedor y cubierta de policarbonato alveolar en la parte superior (Figura 1).

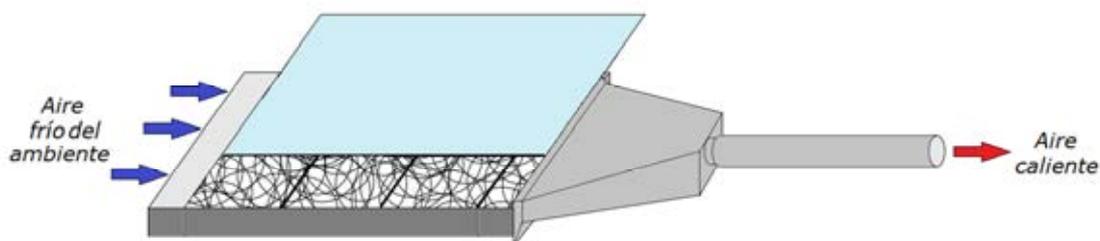


Figura 1. Esquema del colector calentador de aire de matriz porosa.

Las dimensiones del prototipo son: 0,95 m de ancho, 2,10 m de largo y 0,1 m de alto. Como material poroso, se utilizó viruta de acero de color oscuro reciclada de distintos talleres de tornería de la ciudad de Salta. Para disminuir la pérdida de calor radiativa a través de la cubierta transparente, la matriz porosa no fue pintada de negro a fin de aprovechar su baja emitancia infrarroja que la convierte en una superficie selectiva caliente. La matriz quedó conformada, en su mayoría, por acero al Carbón AISI 1045, de color azul oscuro; con un pequeño porcentaje de acero al Cromo Molibdeno AISI 4140, de color plateado. La longitud del absorbedor es de 1,65 m aproximadamente y su alto de 3 cm. Se pintó de negro una pequeña parte de la cara interna del cuerpo del colector. La longitud total, es decir, la longitud del material poroso más la pequeña longitud pintada de negro, es de 1,98 m (Figura 2). El área total de colección es de 1,8 m².

La cubierta de policarbonato alveolar tiene un espesor de 6 mm y el aislante térmico de fondo y costados es lana de vidrio. Para el funcionamiento del colector se utilizó un ventilador axial con una potencia de 30 W que fue colocado en el ducto de salida operando en modo de “succión” (Figura 3).



Figura 2. Mairiz porosa utilizada como material absorbente.



Figura 3. (a) Vista del ventilador axial utilizado, (b) Ventilador instalado en el ducto de salida.

Hacia la salida del colector se instaló una tobera de chapa galvanizada de forma trapezoidal y a continuación el ducto de salida de forma circular y 18 cm de diámetro. En la Figura 4 se muestra la instalación final sobre el colector.



Figura 4. Instalación final de la tobera y ducto de salida del colector.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

La evaluación termo-energética del colector se realizó en exteriores exponiéndolo al sol directo. Para una correcta determinación de la curva de eficiencia térmica se cumplió con las pautas establecidas en la norma ASHRAE 93-2003 para colectores calentadores de aire que exige la variación controlada de la temperatura de entrada del fluido caloportador. A tal fin se construyó un circuito de calentamiento eléctrico del aire de entrada mediante dos velas de cuarzo cuya potencia disipada fue comandada mediante un variador electrónico del tipo dimmer.

El prototipo fue montado en el campo experimental del INENCO ubicado en la Universidad Nacional de Salta (24° 43,7' de Latitud Sur, 65° 24,6' de Longitud Oeste y 1.190 m.s.n.m.) mirando al Norte

con una pendiente de 40° (latitud + 15°). Fue ensayado durante el invierno y primavera de 2017 en un circuito de aire abierto con el ambiente exterior. En la Tabla 1 se detallan los días ensayados.

Mes	Días
Julio	28,31
Agosto	2,3,4,7,8,10,11
	14,15,16,17,18
Setiembre	1,2,5,6,7,8,12
	13,14,18,19,20
	22,25,29,30
Octubre	2,3,4,6,7

Tabla 1. Días de ensayo del colector en el invierno-primavera de 2017.

Durante los días de ensayo, la hora de inicio de operación del equipo fue aproximadamente las 9:30 hs. cuando el colector recibía suficiente radiación solar, finalizando el monitoreo cuando el colector no producía energía útil a las 17:30 hs, dependiendo de las condiciones climáticas del día en particular.

Las variables monitoreadas durante los ensayos fueron las siguientes:

- Temperatura ambiente.
- Radiación solar sobre el plano del colector.
- Presión atmosférica.
- Temperatura en la entrada del colector.
- Temperatura en la salida del colector.
- Temperaturas en 2 posiciones dentro del colector.
- Velocidad del aire en los ductos.

En la Figura 5 se muestra una vista del colector en operación.



Figura 5: Fotografía del colector solar ensayado a circuito abierto.

Se realizaron 3 campañas de medición, diferenciadas por la velocidad del aire circulante. Las mismas se detallan en la Tabla 2.

Período	Duración	Velocidad de flujo	Unidad
Primer	Del 28/07	2.3	m/seg
	al 08/09		
Segundo	Del 09/09	1.9	m/seg
	al 22/09		
Tercer	Del 25/09	1.6	m/seg
	al 07/10		

Tabla 2. Períodos de medición según la velocidad del aire circulante.

En los periodos del 24/08 al 08/09, del 09/09 al 14/09 y del 04/10 al 07/10 se varió la temperatura del aire de entrada mediante el encendido de las velas de cuarzo. Los niveles de potencia disipada fueron: 600, 900 y 1.200 W. En la Tabla 3 se muestran las temperaturas de entrada (T_{fi}) y de salida (T_{fo}) del aire alcanzadas con esas potencias.

Posición	Potencia (W)	Tfi (°C)	Tfo (°C)
0	(Apagada)	-	-
1	600	27.98	44.22
2	900	30.82	46.85
3	1200	34.46	50.03

Tabla 3. Posiciones del dimmer en el circuito de calentamiento auxiliar del aire durante los ensayos.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE MONITOREO

Los datos de temperatura ambiente y radiación solar se registraron con una estación meteorológica marca HOBO modelo H21 ubicada cerca del prototipo. Como sensores de temperatura dentro del colector se utilizaron termocuplas tipo *K* de cromel - alumel con una sensibilidad de 3,6 mV/100 °C. El equipo de monitoreo de las termocuplas se completa con un datalogger ADAM 4018 y un módulo ADAM 4520 que transforma la señal RS485 del 4018 en RS232 para comunicarse con una PC.

En la Figura 6 se muestra un esquema de la ubicación de las termocuplas en el colector. Se instalaron cuatro sensores numerados del 1 al 4. T_1 sensa la temperatura del aire de entrada y T_4 la de salida.

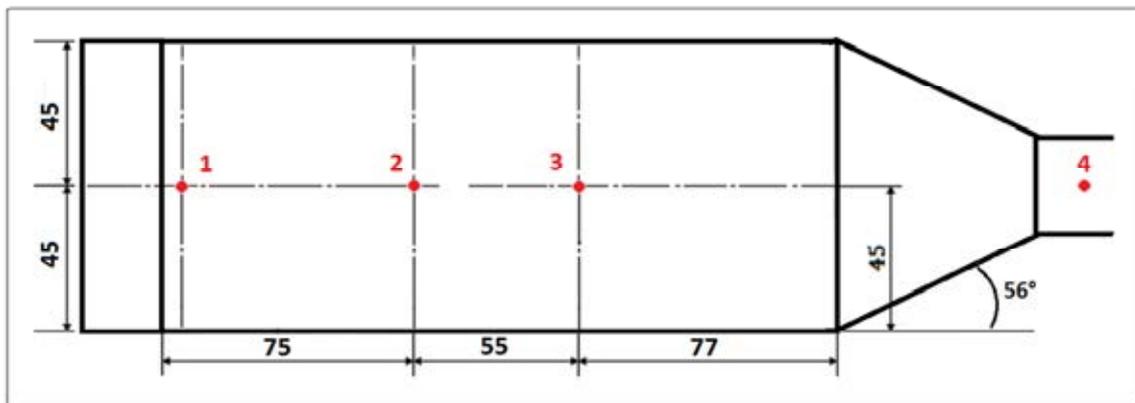


Figura 6. Vista superior del colector. Ubicación de los sensores de temperatura. Cotas en cm.

Para la medición de la velocidad del aire se utilizó un anemómetro de hilo caliente digital marca TSI. La presión atmosférica se midió con una estación meteorológica PEGASUS, ubicada en el techo de un edificio cercano. El valor de la presión atmosférica es necesario para la determinación de la densidad del aire ambiente. Con la densidad se calcula el flujo másico de aire mediante:

$$\dot{m} = \rho_{(P,T)} v A_t \quad (1)$$

donde, v es la velocidad del flujo de aire (m/s); A_t el área de sección transversal del ducto de salida (m^2) y $\rho_{(P,T)}$ la densidad del aire a la presión P (Pa) y a la temperatura T (K), calculada con la siguiente ecuación, válida para gas ideal según el modelo de la U.S. Standard Atmosphere 1976, (Lide, 1990):

$$\rho_{(P,T)} = \rho_{ref} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \left(\frac{T_{ref}}{T} \right) \quad (Kg/m^3) \quad (2)$$

siendo P la presión del lugar, $\rho_{ref} = 1,2929 \text{ Kg/m}^3$ a $T_{ref} = 273,13 \text{ K}$ y a $P_{ref} = 101.325 \text{ Pa}$. T es la temperatura absoluta promedio del aire entre la entrada y la salida del colector.

MEDICIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DEL COLECTOR Y DE LA POROSIDAD

Para determinar la potencia del ventilador forzador del aire es necesario conocer la caída de presión a través del colector, ΔP . Para ello se utilizó un manómetro diferencial digital marca TESTO con una resolución de 1 Pa (Pascal) y rango de medida de -150 a +150 hPa. Juntamente se midió la velocidad del flujo de aire con el anemómetro TSI a fin de obtener pares ordenados (v , ΔP). Para conectar las puntas del manómetro diferencial al canal de aire del colector, se emplearon mangueras plásticas conectadas a 2 jeringas para insulina (sin sus émbolos). La Figura 7 muestra las ubicaciones de las dos jeringas que atraviesan la chapa y el aislante del fondo del colector hasta alcanzar la base del canal de flujo del aire.

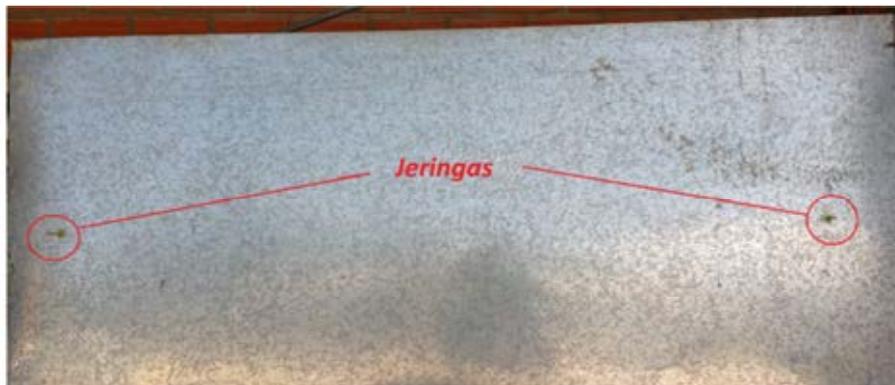


Figura 7. Instalación de las jeringas para la medida de la caída de presión.

Con los datos relevados se construyó una tabla de doble entrada con el flujo másico [Ec. (1)] en una columna y la diferencia de presión en otra. A este conjunto de pares ordenados se le aplicó una regresión cuadrática con cruce por 0 (origen coordinado). En la Figura 8 se muestra la curva obtenida.

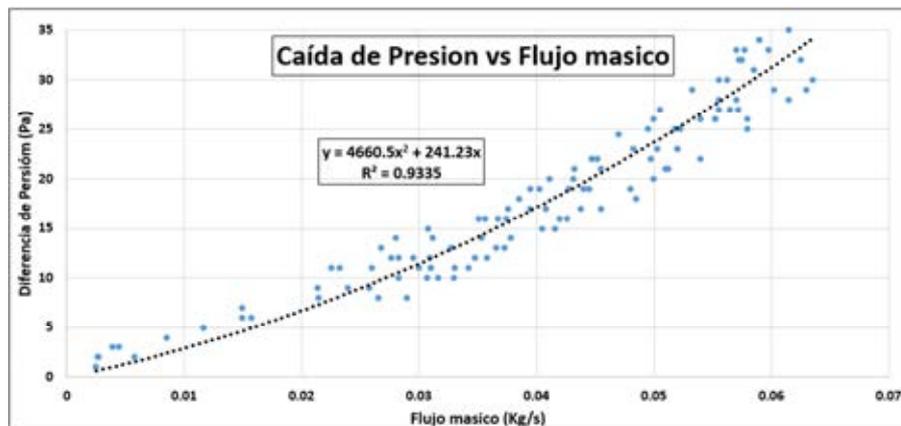


Figura 8. Caída de presión vs. flujo másico para el colector de matriz porosa.

Se observa en la figura que la caída de presión aumenta con el cuadrado del flujo másico del aire. El máximo valor de ΔP es del orden de 35 Pa, correspondiente a un flujo másico de 0,065 Kg/s.

La potencia del ventilador necesaria para mantener el flujo circulante se calcula mediante la expresión:

$$Pot = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho_a} \quad (3)$$

donde ρ_a es la densidad del aire [Ec. (2)] y Pot la potencia eléctrica consumida por el ventilador en W. Reemplazando el polinomio cuadrático de ajuste de la caída de presión se obtiene:

$$Pot = \frac{(4660,5m^3 + 241,23m^2)}{\rho_a} \quad (4)$$

Por lo tanto, la potencia del ventilador crece con el cubo del flujo másico del aire que circula dentro del colector de matriz porosa.

Cuando se trabaja con matrices porosas hay tres parámetros importantes a determinar a fin de caracterizar la matriz. Estos son: la porosidad o factor de huecos, ε , el área transversal efectiva de transferencia de calor por conducción, A_{tc} y el área lateral efectiva de transferencia de calor por convección, A_m (Hernández et al., 2015).

El factor de huecos ε se determina experimentalmente mediante un procedimiento que consiste en determinar el volumen de agua que llena los intersticios de una muestra del material poroso. Este es el volumen de huecos V_h . Si V es el volumen contenedor de la matriz y el agua, entonces la porosidad se calcula como:

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V} \quad (5)$$

La porosidad así determinada para la matriz porosa ensayada es del 96 %. La incerteza de este resultado se calculó mediante la técnica de propagación de errores resultando: $\varepsilon = (0,96 \pm 0,02)$.

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

En la Figura 9 se presentan los valores de irradiancia solar global sobre el plano del colector y los de temperatura ambiente medidos cuando el colector funcionó con un flujo másico de 0,065 Kg/s. Los valores máximos de T_a estuvieron por encima de los 25 °C excepto los días 2, 3 y 14 de Agosto. En la mayoría de los días las amplitudes térmicas alcanzaron los 16,5 °C.

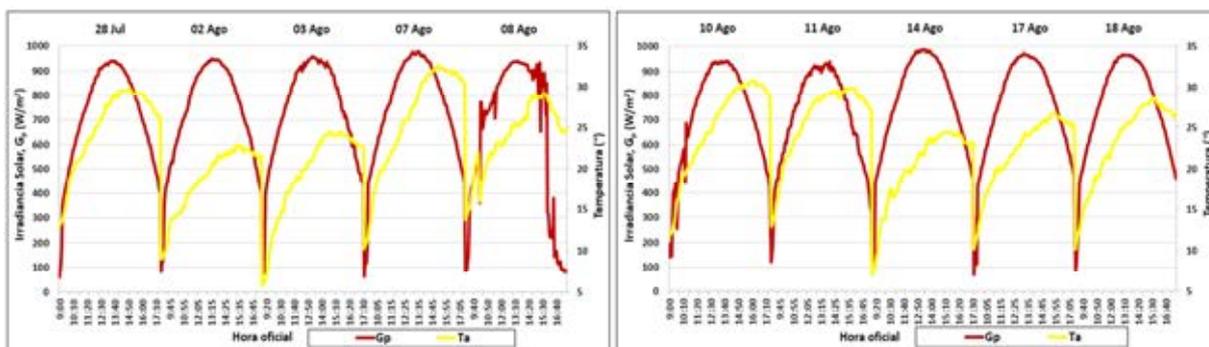


Figura 9. Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a .

Durante los ensayos con un flujo másico de 0,051 Kg/s (09/09 al 22/09) las condiciones ambientales fueron similares, salvo el día 20 de setiembre en que la temperatura ambiente superó los 35 °C. Finalmente, durante los ensayos con un flujo másico de 0,043 Kg/s (25/09 al 07/10), la temperatura ambiente nunca fue inferior a 15 °C. Sin embargo, en estos días, la temperatura máxima no superó los 35 °C.

Medición de la temperatura en entrada y salida del colector

En las Figura 10 se grafican las curvas de temperaturas del aire medidas en la entrada, T_{fi} , y en la salida, T_{fo} , del colector. El encendido de las velas de cuarzo se realizó a partir del 24 de agosto y entonces la temperatura de entrada al colector superó los 38 °C.

Los valores máximos alcanzados por el aire a la salida del colector fueron de 50,5 °C y 52,4 °C cuando las temperaturas de entradas fueron de 33,8 °C y 36,6 °C, respectivamente. Bajo estas condiciones climáticas, este prototipo produjo un incremento de temperatura entre 15 °C y 20 °C.

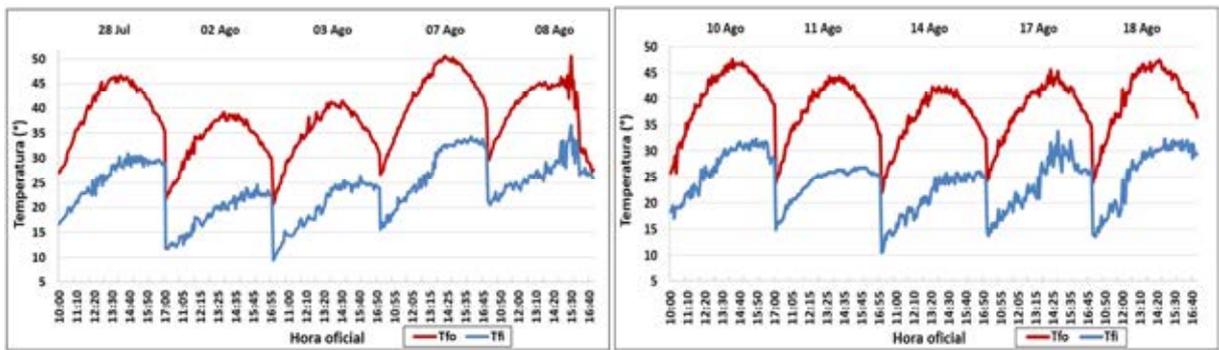


Figura 10. Evolución temporal de las temperaturas de entrada y salida del colector a $\dot{m} = 0,065 \text{ Kg/s}$.

Con un flujo másico de $0,051 \text{ Kg/s}$, el máximo valor de temperatura de salida del aire fue de $56,8 \text{ }^\circ\text{C}$ con la temperatura de entrada de $35,9 \text{ }^\circ\text{C}$. En este caso, el aumento promedio de la temperatura del aire a través del colector fue de $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Con un flujo másico de $0,043 \text{ Kg/s}$, el promedio del salto térmico fue de $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Los máximos en la temperatura de salida medida se mantuvieron por arriba de los $49 \text{ }^\circ\text{C}$ con temperaturas de entrada de hasta $35 \text{ }^\circ\text{C}$. El día 30 de setiembre, la temperatura de salida del aire fue la mayor de todos los días ensayados, con un valor superior a los $59 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta dependencia de la temperatura de salida del aire con el flujo másico es coherente debido a que cuanto mayor es el flujo, menor es la temperatura de salida en cualquier tipo de colector solar.

Distribución de temperatura del aire dentro del colector

Con el objeto de evaluar la variación de la temperatura del aire a lo largo del colector, se representaron gráficamente los valores medidos por las 4 termocuplas interiores en función de la distancia desde la entrada al colector. Cada curva presentada corresponde a un día distinto en el período 28/07 - 29/08 al mediodía solar a fin de comparar el cambio en la temperatura de salida con el cambio en el movimiento aparente del sol sobre la bóveda celeste. Como sólo se cuenta con medidas a distancias discretas, se generó una curva de tendencia potencial, para representar el posible comportamiento de la temperatura. En la Figura 11 se pueden observar las curvas de tendencia obtenidas.

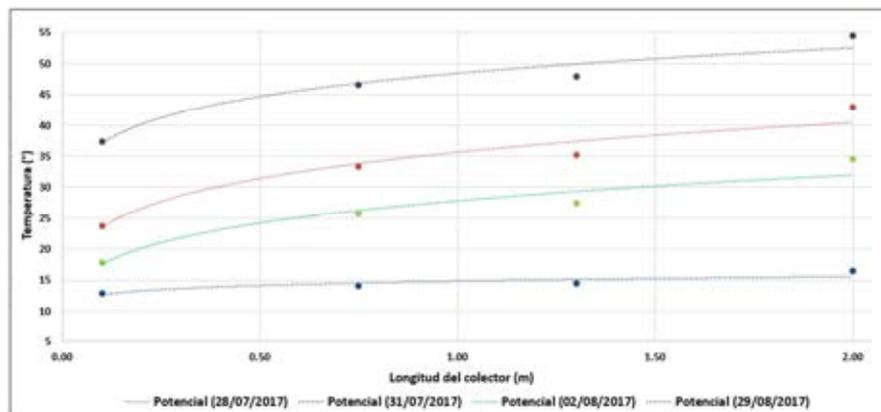


Figura 11. Distribución de la temperatura del aire dentro del colector para $\dot{m} = 0,065 \text{ Kg/s}$.

Se puede observar que el día 29 de Agosto se registraron las temperaturas más altas debido al encendido de las velas de cuarzo a la entrada del colector, mientras que las temperaturas más bajas se registraron el día 31 de Julio. En este caso, la variación de temperaturas a lo largo del colector es pequeña debido a la poca radiación que hubo ese día. Se puede concluir de la figura que la longitud del colector podría ser aumentada a fin de obtener una mayor temperatura de salida.

Cálculo de la energía útil generada por el colector

La energía útil generada por el colector se calcula mediante (Duffie y Beckman, 2006):

$$Q_u = \dot{m}c_p(T_{fo} - T_{fi}) \quad (W) \quad (6)$$

donde c_p es el calor específico del aire a presión constante. En la Figura 12 se presentan los valores de la energía útil generada por el colector a un flujo másico de 0,065 Kg/s junto con los valores de irradiancia solar global, G_p , sobre el plano del colector. Se observa que los valores de energía útil generada durante el período graficado presentan máximos entre 1,0 y 1,3 KW al mediodía solar. Esto garantiza una muy buena producción de energía térmica diaria.

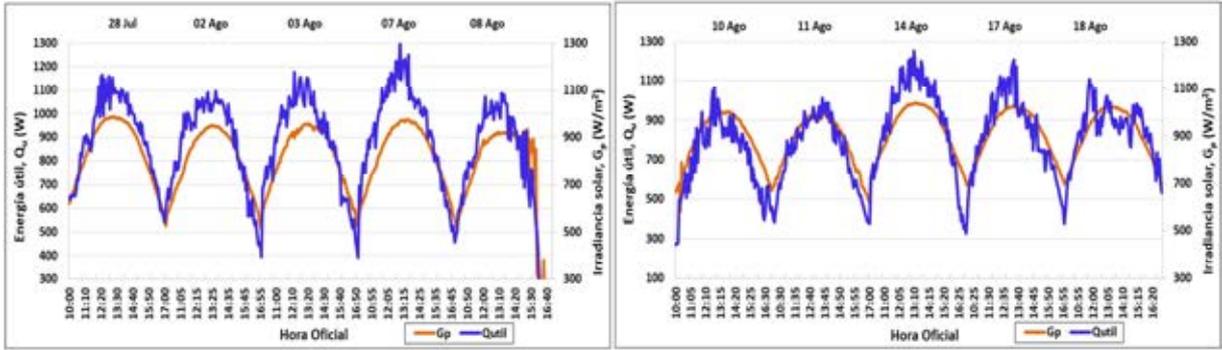


Figura 12. Irradiancia solar sobre el plano del colector y energía útil producida con $\dot{m} = 0,065$ Kg/s.

Con un flujo másico de aire de 0,065 Kg/s la producción de energía útil diaria alcanzó valores cercanos a 23 MJ. Para un flujo másico de 0,051 Kg/s, la producción diaria promedio de energía útil fue de 20,2 MJ mientras que para el flujo másico de 0,043 Kg/s, el colector produjo, en promedio, 19,5 MJ diarios. Estos valores son realmente altos y son consecuencia del gran contacto térmico existente entre el aire circulante y el medio absorbedor constituido por la matriz porosa que, por su constitución y características superficiales, constituye una superficie extendida selectiva caliente (gran área expuesta por unidad de volumen con alta absorción solar y baja emisividad infrarroja). Una consecuencia comprobable de la baja emisividad IR de la matriz absorbedora es que la cubierta transparente no se recalentó ni deformó por dilatación térmica durante las horas de insolación al no existir un intercambio radiativo importante entre ellas.

CURVAS DE EFICIENCIA TÉRMICA INSTANTÁNEA

Las curvas de eficiencia instantánea para los tres flujos másicos ensayados se obtuvieron siguiendo los lineamientos de la norma ASHRAE 93-2003. A tal fin, se realizaron los ensayos variando la temperatura de entrada del aire mediante las velas de cuarzo en escalones de potencia disipada según los valores indicados en la Tabla 3. Dado que la norma exige que la radiación solar y la temperatura ambiente sean lo más estable posible durante el ensayo, se realizaron las medidas alrededor del mediodía solar, entre media hora antes y media hora después del mismo.

La eficiencia instantánea de un colector solar se define mediante la siguiente expresión:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c G_p} = \frac{\dot{m}c_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c G_p} \quad (7)$$

Graficando los valores arrojados por la ecuación (7) en función de la variable $(T_{fi} - T_a)/G_p$ se obtuvo la curva graficada en la Figura 13 para el máximo flujo másico ensayado.

La ecuación de la curva de eficiencia instantánea obtenida por regresión lineal es la siguiente:

$$\eta_i = 0,644 - 11,748 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right) \quad (8)$$

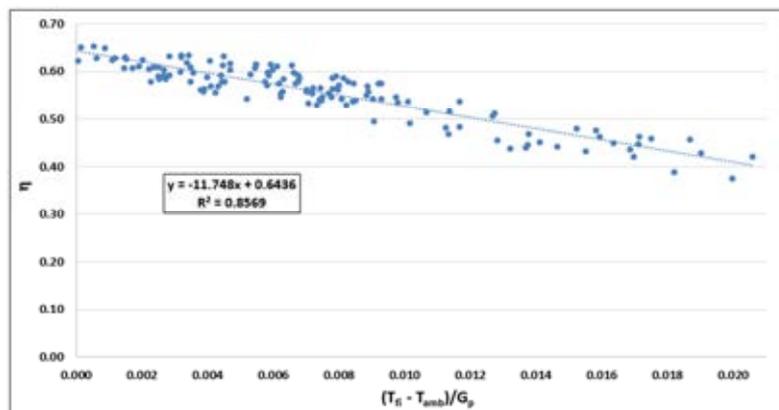


Figura 13. Curva de eficiencia instantánea del colector de malla porosa para $\dot{m} = 0,065 \text{ Kg/s}$.

El valor máximo de eficiencia obtenido (0,644) es alto, teniendo en cuenta que se trata de un colector calentador de aire y que el flujo másico ensayado es relativamente bajo. A modo comparativo, la Tabla 4 muestra las curvas de eficiencia térmica de distintos prototipos de colectores solares calentadores de aire y los flujos másicos empleados, publicadas en otros trabajos.

Autores	Tipología	$\dot{m}(\text{Kg/s})$	$A_c (\text{m}^2)$	Curva de eficiencia
Hernández et al., 2007	Placa perforada.	0,015	1,93	$\eta_i = 0,518 - 7,329 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right)$
Durán et al., 2011	Paso simple con malla porosa.	0,064	2,22	Eficiencia cercana al 65 %
González et al., 2012	Doble flujo en contracorriente.	0,021	2,00	$\eta_i = 0,492 - 6,864 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right)$
Quiñonez y Hernández 2012	Doble flujo en contracorriente.	0,030	2,16	$\eta_i = 0,410 - 7,020 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right)$
González, et al., 2014	Doble paso con matriz porosa.	0,020	2,16	$\eta_i = 0,436 - 6,223 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right)$

Tabla 4. Curvas de eficiencia de distintos colectores calentadores de aire ensayados por otros autores

Se observa que los valores de ordenada al origen y pendiente de la curva obtenida para el prototipo presentado en este trabajo son más altos que los de la tabla 4, indicando que el factor de remoción de calor F_R de nuestro colector es más alto que el de los demás prototipos como consecuencia de la potenciación de la transferencia de calor desde la matriz porosa al aire circulante y al mayor flujo másico empleado. Sin embargo, estos valores son comparables al del prototipo de Duran et al. (2011).

Para los restantes flujos másicos ensayados las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

$$\text{Para } \dot{m} = 0,051 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}: \eta_i = 0,554 - 9,068 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right); R^2 = 0,87 \quad (9)$$

$$\text{Para } \dot{m} = 0,043 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}: \eta_i = 0,550 - 5,103 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right); R^2 = 0,83 \quad (10)$$

Estas curvas deben predecir con buena exactitud el comportamiento termo-energético del colector para condiciones climáticas y de funcionamiento similares a las ensayadas.

Eficiencia térmica diaria del colector de matriz porosa en función del flujo másico del aire

La eficiencia térmica diaria del colector se calcula como:

$$\eta_{c,día} = \frac{\int_{h_s}^{h_p} Q_u(t) dt}{A_c \int_{h_s}^{h_p} G_p(t) dt} \cong \frac{(\dot{m}c_p) \sum_{i=1}^N (T_{fo,i} - T_{fi,i}) \Delta t}{A_c \sum_{i=1}^N G_{p,i} \Delta t} \quad (11)$$

donde h_s es la hora de salida y h_p la hora de puesta del sol. Dado que el monitoreo del colector se realiza en pasos temporales finitos de extensión Δt , se debe utilizar la aproximación definida por la sumatoria del lado derecho de la ecuación anterior donde N es el número total de medidas tomadas durante el período de funcionamiento diario del colector.

En la Figura 14 se presentan los valores de eficiencia térmica diaria obtenidos con los tres valores de flujo másico ensayados. El punto naranja representa el valor promedio de la eficiencia diaria para cada condición de funcionamiento mientras que los segmentos verticales están limitados por los valores máximo y mínimo absolutos registrados en cada período. Se observa que, en general, la eficiencia diaria crece conforme el valor del flujo másico aumenta.

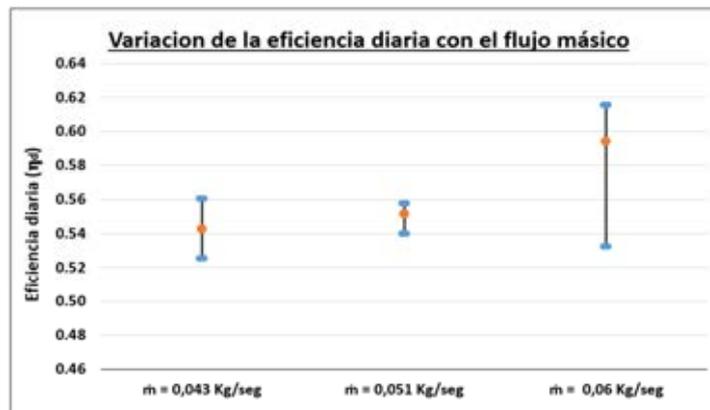


Figura 14. Eficiencia térmica diaria del colector en función del flujo másico del aire

La eficiencia térmica diaria promedio para un flujo másico de 0,043 Kg/s es cercana al 54 % mientras que para el flujo más alto ensayado, 0,065 Kg/s, es cercana al 60 %. Estos valores indican una muy buena performance termo-energética del prototipo desarrollado en este trabajo y la conveniencia de operarlo con un flujo másico superior a 0,05 Kg/s.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño y evaluación termo-energética de un nuevo prototipo de colector solar calentador de aire que posee como elemento absorbedor una matriz porosa selectiva de acero reciclado con factor de huecos o porosidad del 96 %, determinada experimentalmente.

El colector fue operado a tres flujos másicos de aire diferentes (0,065; 0,051; y 0,043 Kg/s). Se encontró que la eficiencia térmica instantánea máxima, para el máximo flujo másico, es del 64 %, valor muy aceptable para un colector calentador de aire. Para los otros flujos másicos, la eficiencia térmica instantánea máxima encontrada fue del 55 % aproximadamente.

La caída de presión a través del colector fue determinada experimentalmente, obteniéndose un valor máximo de 35 Pa para un flujo másico del aire de 0,065 Kg/s. A partir de la curva de la dependencia de la caída de presión con el flujo másico se encontró una dependencia cúbica de la potencia necesaria del ventilador con el flujo másico del aire.

En condiciones normales de funcionamiento el incremento de temperatura a lo largo del colector estuvo entre 15 y 21 °C. La temperatura máxima alcanzada a la salida del colector fue de 59 °C para una temperatura de entrada de 36 °C. En cuanto a la energía útil generada por día, los valores promedio fueron de 23 MJ; 20,2 MJ y 19,5 MJ, para el mayor y para los 2 menores flujos de aire ensayados, respectivamente. Estos valores son realmente altos y son consecuencia del gran contacto

térmico existente entre el aire circulante y el medio absorbedor constituido por la matriz porosa que, por su constitución y características superficiales, constituye una superficie extendida selectiva caliente. Los valores de eficiencia térmica diaria se encuentran entre el 54 % y el 60 % e indican una muy buena performance termo-energética del prototipo desarrollado, siendo conveniente operarlo con un flujo másico superior a 0,05 Kg/s.

REFERENCIAS

- Chamoli S., Chauhan R., Thakur N. S., Saini J. S. (2012). A review of the performance of double pass solar air heater. *Renewable Sustainable Energy Review*; 16:481–92.
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3rd edition, John Wiley & Sons, USA, 2006.
- Durán G., Blanc A., Albeza F., Martínez C., Condorí M. (2011). Diseño, construcción y ensayos en circuito cerrado de un colector solar de aire con matriz porosa. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 15, p. 721 – 729.
- González S. M., Flores Larsen S., Hernández A. L. (2012). Simulación del comportamiento térmico de un colector solar de aire de doble flujo mediante el software SIMUSOL. *ASADES 2012*.
- González S. M., Hernández A., Quiñonez J. (2014). Ensayo de un colector solar calentador de aire de doble paso con matriz porosa para calentamiento de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 18, pp. 08.89 – 08.95.
- Hernández A., Fernández C., Salvo N. y Suligoy H. (2007). Diseño, construcción y primeros ensayos de un colector solar calentador de aire de tipo loop convectivo para el calentamiento de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, N° 2, pp. 03.76 –03.82.
- Hernández A. L. y Quiñonez J. E. (2017). Experimental validation of an analytical model for performance estimation of natural convection solar air heating collectors. *Renewable Energy*, 117, 1, pp. 202-216.
- Hernández A. L., Quiñonez J. E. y González S. (2015). Modelización numérica de un colector solar calentador de aire con matriz porosa metálica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 19 - N° 1, Sección 8, pág. 133-145.
- KPGM (2016). Desarrollo de energías renovables Contexto latinoamericano y el caso argentino. En línea. <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/ar/pdf/development-of-renewables.pdf>.
- Lide, D. (1990). *Handbook of Chemistry and Physics*, 71st ed., CRC Press, Boston.
- Ministerio de Energía y Minería (MinEM), Sitio Web: <https://www.argentina.gob.ar/energiaymineria>. (Último acceso 15 de Agosto de 2018).
- Quiñonez, J., Hernández, A., Flores Larsen, S. (2012). Evaluación termo energética de un colector solar calentador de aire de doble paso en contracorriente diseñado para la calefacción de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 16 - N° 1, Sección 3, pág. 55 – 62.
- Singh Y. A., Kumar Thapak M. (2014). Artificially roughened solar air heater: experimental investigations. *Renewable Sustainable Energy Review* 36:370–411.
- Sopian K., Alghoul M.A., Alfegi E.M., Sulaiman M.Y., Musa E.A. (2009). Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous–nonporous media. *Renewable Energy* 34:640–645.
- Turk, T. I., Dursun, P. (2005). Effect of packing in the airflow passage on the performance of a solar air-heater with conical concentrator. *Applied Thermal Engineering* 25:1349–62.

ABSTRACT: This paper presents the development and thermo-energetic evaluation of a new solar air heater collector prototype that has a porous matrix of recycled steel as an absorbing element. The porosity of the matrix is 96 %. The collector was tested in the city of Salta, with forced flow to open circuit and slope of 40° under winter weather conditions. The average thermal jump between the collector inlet and outlet temperatures was 16.2 °C, 19 °C and 21 °C, for three tested air mass flows: 0.065 Kg/s, 0.051 Kg/s and 0.043 Kg/s respectively. The instantaneous thermal efficiency curves were obtained experimentally, presenting maximum values of 64 %, 55.4 %, and 55.0 %, for the three flows tested respectively. These values indicate a very good thermo-energetic performance of this prototype and the convenience of operating it with an air mass flow greater than 0.05 Kg/s.

Keywords: solar collector, porous matrix, monitoring and simulation

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INDIRECTO DE CALEFACCIÓN SOLAR TÉRMICA DE AIRE, APLICADO AL SECADO DE HIERBAS

J. M. Morsetto, A. I. Lema, M. I. Pontin y J. M. Lucchini

Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería – Grupo de Energía Solar
Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto
Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: alema@ing.unrc.edu.ar

Recibido 11/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: El objetivo de este trabajo, fue desarrollar un equipo de secado indirecto sustentado completamente con energía solar. El sistema de calefacción de aire para el secado, utiliza un colector solar de tubos evacuados para aumentar la energía térmica del agua, que luego es transferida parcialmente al aire en un intercambiador de calor agua-aire. El agua circula por efecto termosifón en un circuito cerrado entre el colector solar y el intercambiador de calor, mientras que el aire ingresa al equipo mediante un ventilador y atraviesa el intercambiador de calor antes de entrar a la cámara de secado. Los requerimientos eléctricos del sistema son provistos por un panel fotovoltaico. El equipo desarrollado fue ensayado y los resultados se presentan en gráficos. Se demuestra que es posible desarrollar un equipo que utilice únicamente energía solar, logrando un secado adecuado en relación a la calidad del producto obtenido y el tiempo empleado.

Palabras clave: secado indirecto; hierbas aromáticas; calentamiento de aire, flujo termosifónico.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de hierbas aromáticas y medicinales tiene como objetivo principal la producción de aceites esenciales y/o de hierbas secas para el mercado herbolario o alimenticio (Ringuelet et al., 2000). Actualmente la producción y/o recolección de plantas medicinales y aromáticas se presenta como una alternativa de diversificación productiva para predios familiares, complementaria a la horticultura (Banchero et al., 2008).

Argentina produce materia prima de excelente calidad, pero actualmente se le está haciendo muy difícil competir en el mercado internacional. Un camino para mejorar la competitividad es el valor agregado de la producción y la calidad del producto final (Paunero, 2017).

En relación a la calidad del producto obtenido, los secadores solares indirectos presentan numerosas ventajas, por ejemplo, permiten un mayor control en el proceso, facilitan la manipulación de los productos, permiten integrar una fuente auxiliar de energía y posibilitan el secado de productos sensibles a la radiación solar directa sin pérdida de calidad, ya sea color natural, destrucción de vitaminas y/o valor nutritivo (Corvalán et al., 2000).

La operación de secado, debe producir entonces, la mayor pérdida posible de agua libre del vegetal recién cosechado y a una temperatura que no supere los 50°C, evitando así, pérdidas de aceite esencial y de calidad en el producto obtenido (Bandoni, 2000). Desde esta perspectiva, la posibilidad de hacer el secado a bajas temperaturas in situ, contribuiría a mejorar la calidad del producto seco obtenido. La utilización del recurso solar como única fuente de energía presenta la ventaja de poder desarrollar el emprendimiento de secado de manera autónoma en la cercanía de los sembradíos.

En este trabajo se presenta el desarrollo y montaje de un equipo de secado indirecto que utiliza la energía solar como única fuente de energía para cubrir los requerimientos térmicos y eléctricos

demandados en la operación de secado. Se implementa un sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire, que permite obtener un producto seco de alta calidad.

El equipo de secado, integrado al sistema indirecto de calentamiento del aire, fue ensayado en su conjunto y los resultados se presentan en gráficos, concluyendo que el diseño propuesto es técnicamente viable, conveniente en cuanto utiliza solamente energía solar y adecuado en relación a la calidad del producto obtenido y al tiempo de secado.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO DESARROLLADO

El equipo de secado desarrollado y analizado en este trabajo, se muestra en la figura 1 y está compuesto básicamente por un sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire, una cabina de secado y un sistema fotovoltaico que provee la energía eléctrica requerida.

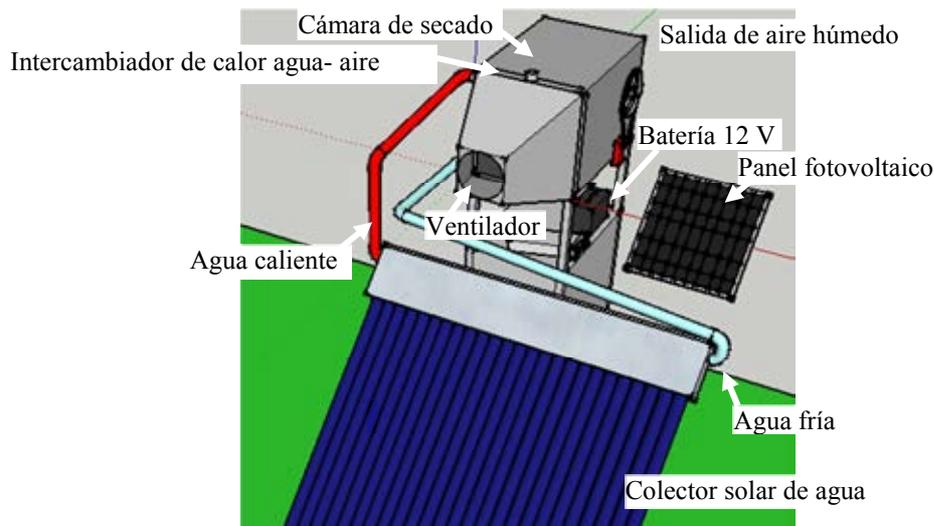


Figura 1. Esquema del equipo de secado solar indirecto

El diseño del equipo de secado, fue pensado hace dos años, de manera que pudiera desempeñarse utilizando solamente energía solar, siempre que el recurso solar estuviera disponible. A partir de entonces, se ha venido trabajando en el desarrollo del diseño y en su construcción.

En un trabajo inicial, (Garnica et al., 2016), se evaluó el desempeño del intercambiador de calor aire-agua (figura 1), que se utilizaría en el calentamiento del aire para el secado y se analizó la posibilidad que el agua se moviera por efecto termosifón a través del intercambiador de calor. Los resultados fueron alentadores y se obtuvo de la experimentación, información relevante para avanzar en el diseño definitivo. Se procedió a la construcción de la sección de ingreso del aire y de la cabina de secado con un diseño de bandejas giratorias accionadas manualmente (figura 1). En un trabajo posterior, (Lema et al., 2017), se estudió el funcionamiento del secadero bajo condiciones de operación controladas, lo cual fue posible mediante la utilización de una máquina de ensayos. Se concluía que, para condiciones de procesos semejantes a las utilizadas durante la experimentación, el desempeño del secadero era satisfactorio, en relación al tiempo de secado y la calidad del producto seco obtenido.

A los fines de completar la ejecución del diseño, en este trabajo se incorpora a lo ya desarrollado, la implementación de un sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire y su utilización en el secado de perejil. Se automatizó también la rotación de las bandejas ubicadas en la cámara de secado, y se incorporó la utilización de energía solar fotovoltaica para satisfacer los requerimientos de energía eléctrica durante el proceso de secado.

DISEÑO DEL SISTEMA INDIRECTO DE CALEFACCIÓN SOLAR TÉRMICA DE AIRE

El diseño del sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire, puede observarse en la figura 2. El agua es el fluido caloportador, se calienta en un colector solar y se mueve en un circuito cerrado por efecto termosifón, sin la utilización de bombas impulsoras. La energía que se almacena en el agua, es luego transferida parcialmente al aire, en el intercambiador de calor agua-aire.

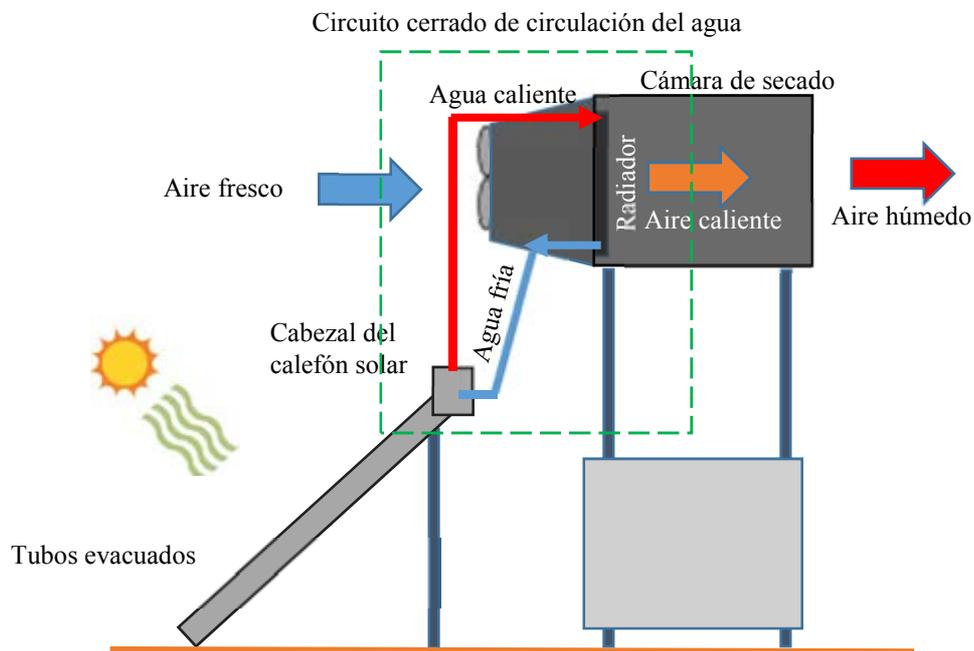


Figura 2 Sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire

El intercambiador de calor, es un radiador de uso automotriz, de paso simple, con aletas exteriores y los tubos por donde circula el agua, también están aletados interiormente. El radiador consta de un domo superior, por donde ingresa el agua caliente, un panel de tubos y aletas, que es donde se hace el intercambio de calor y un domo inferior donde se recoge el agua fría que sale del radiador. La entrada y la salida están del mismo lado del radiador (Garnica et al., 2016).

En su paso por el colector solar, el agua incrementa su temperatura y consecuentemente disminuye su densidad. La diferencia de densidades entre el agua caliente y fría, genera la fuerza impulsora para flujo termosifónico. Luego a los fines de favorecer el efecto termosifón, fue necesario diseñar el circuito de agua, con la menor pérdida de carga posible, considerando que la caída de presión en el radiador era inevitable y que la selección del calefón solar a utilizar resultaba determinante.

Flujo termosifónico. Fundamentos

Los sistemas de calentamiento solar de agua que utilizan el principio de funcionamiento termosifónico, se basan en la variación de la densidad con la temperatura. En el caso del agua, la densidad disminuye con el aumento de la temperatura, esto hace que en un circuito cerrado de agua, si aplicamos calor a una parte del circuito, el agua caliente tenderá a subir, debido a su menor densidad, mientras que el agua fría bajará para ocupar ese espacio vacío, generando de esta manera una circulación del agua.

En un colector solar, el flujo debido al efecto termosifón, dependerá de las condiciones climáticas, del estado del agua en las distintas partes del circuito y de las pérdidas de carga. Los valores máximos de estos caudales son del orden de los 0,011 kg/s, lo cual es un valor extremadamente bajo, ocasionado por una diferencia de presión que a lo sumo es de 30 mm de columna de agua (Morrison y Ranatunga, 1980).

Debido a que la fuerza impulsora del movimiento del fluido es pequeña, no es posible introducir caudalímetros en el circuito ya que ocasionarían caídas de presión, que por pequeñas que sean, afectarán sustancialmente el flujo termosifónico de los colectores solares. Entre los dispositivos aptos

para determinar estos bajos caudales, se encuentra el medidor de caudal Láser-Doppler, que es ideal desde el punto de vista técnico, ya que no introduce ninguna perturbación al flujo dentro de la tubería, pero el costo del equipo es muy elevado (Lucchini et al., 2007).

El diseño y montaje del circuito cerrado del agua, se realizó entonces de modo de agregar la menor pérdida de carga posible a la producida en el radiador y no se incluyeron caudalímetros en la tubería. Si bien, no fue posible medir el caudal de agua a través del circuito cerrado, debido a que no se disponía de los dispositivos adecuados, se evidenció su existencia, a partir de la evolución de las temperaturas registradas durante los ensayos realizados con el equipo completo operando.

Selección del calefón solar. Fundamentos

Entre los colectores solares disponibles en el laboratorio del GES (Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto), el que presentaba características más favorables, es uno de tubos evacuados, del tipo water-in-glass, conocido como “manifold”, cuyo nombre deviene del inglés técnico, donde en distintas acepciones se le traduce como múltiple, tubo, distribuidor o colector.

El principio de funcionamiento básico del sistema water-in-glass, se esquematiza en la figura 3. Consta de un vaso de doble pared de vidrio (borosilicato) donde se ha hecho vacío, estando la pared interna recubierta de un material selectivo que absorbe la radiación solar. Al haber vacío entre la pared interna y la externa, se minimizan las pérdidas de calor por conducción y convección. De las bajas pérdidas radiativas da cuenta el material selectivo que absorbe mucho en el espectro electromagnético visible e infrarrojo de onda corta y emite poco a partir del infrarrojo de onda larga. Los sistemas del tipo water-in-glass, tienen una inercia térmica muy grande (Barral et al, 2017).



Figura 3: Tecnología del sistema water-in-glass

En la figura 4, se muestra el colector solar utilizado del tipo water-in-glass (provisto por la empresa HITEC Solar de la ciudad de Córdoba). Es un equipo de 25 tubos, lo cual implica que tiene una masa de agua de unos 75 kg cuando está en funcionamiento. El equipo tiene una estructura soporte que lo posiciona a 45° respecto a la horizontal, que es un ángulo adecuado para esta región del país.



Figura 4: colector solar “manifold” del tipo tubos evacuados sistema water-in-glass

Los tubos se inervan en la parte superior a un cabezal de sección cuadrada, donde quedan sellados por la acción de dos O-rings internos de silicona. En la figura 5, se muestra el esquema de inserción del tubo en el cabezal colector, con un esbozo aproximado del movimiento del fluido caliente y frío entre

el tubo y el cabezal colector (Budihardjo et al., 2007). La impulsión en el cabezal de sección cuadrada ocurre debido a un levantamiento del colector del lado caliente de 5 cm, de modo de garantizar que la circulación termosifónica se inicie en ese sentido. En el interior de los tubos, el movimiento de calentamiento del fluido, es por convección natural.

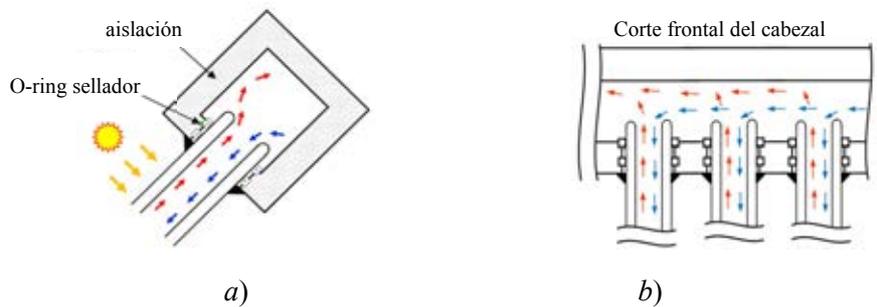


Figura 5: Cabezal colector: a) vista transversal esquematizando circulación en tubo; b) corte frontal con circulación en tubos y pasaje interior del cabezal colector.

Este colector, es capaz de asegurar un buen desempeño en días de invierno, nubosos e incluso con lluvia, debido a su construcción basada en tubos cilíndricos, esto es, captan la radiación solar desde la salida del sol hasta su ocaso, incluyendo la radiación difusa. Cada tubo es una unidad sellada, requiere poca manutención, y si es necesario se reemplaza a bajo costo. Por la separación existente entre tubos, el viento circula libremente entre ellos haciendo estos colectores más resistentes a los vendavales, sin anclajes reforzados. Acumulan menos polvo y suciedad y presentan mejor autolimpieza.

Calentamiento del aire

El aire se calienta en su paso a través del intercambiador de calor agua-aire en flujo cruzado, cuyo desempeño y eficiencia fue evaluada en un trabajo anterior (Garnica et al., 2016). El movimiento a lo largo del equipo se realiza mediante un electroventilador de uso automotriz genérico estándar de 12 pulgadas de diámetro que funciona con 12 V de corriente continua, y en las condiciones de operación tiene un consumo aproximado de 80 W. La regulación del caudal de aire, se realiza modificando el área de entrada de aire.

MONTAJE DEL EQUIPO DE SECADO

El montaje del equipo de secado completo, se muestra en la figura 6.

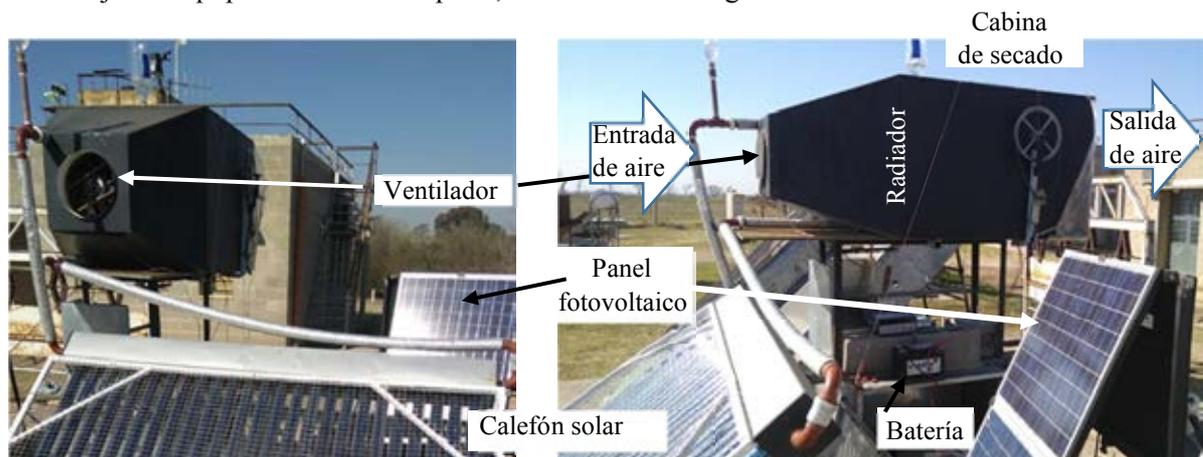


Figura 6: Montaje del equipo de secado funcionando enteramente con energía solar

Al sistema indirecto de calefacción solar térmica de aire descrito en la sección anterior, se le suma un panel fotovoltaico, que alimenta eléctricamente al equipo y un monovolumen compuesto por tres partes, la sección cónica de ingreso del aire de secado, una delgada porción donde se encuentra el radiador y la cabina de secado, en la cual se disponen cuatro bandejas giratorias, donde se coloca el producto a secar.

Como el equipo de secado operaría a la intemperie, la tubería del circuito cerrado del agua se aisló térmicamente y la cámara de secado se recubrió con pintura negra para favorecer su calentamiento. Se automatizó también la rotación de las bandejas giratorias (figura 7 a), que anteriormente se realizaba en forma manual, para lo cual se utilizó una polea, una correa y un motor de 12 voltios (figura 7 b), de uso habitual en el levantamiento de cristales en automóviles. La energía eléctrica requerida para el accionamiento del ventilador y del motor que mueve las bandejas, se obtiene de un panel fotovoltaico.

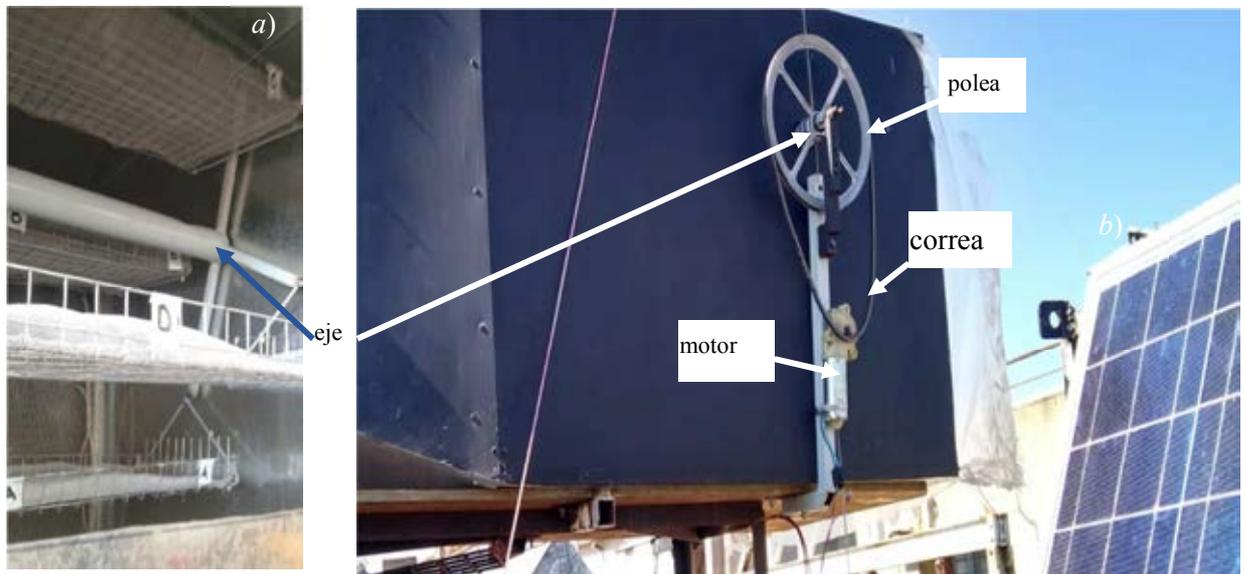


Figura 7: a) Bandejas rotatorias b) Mecanismo que mueve las bandejas rotatorias

VALORACIÓN DEL DISEÑO DEL SISTEMA INDIRECTO DE CALEFACCIÓN SOLAR TÉRMICA DE AIRE Y DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE SECADO

Para la evaluación del desempeño del equipo de secado, se realizó una experiencia de secado de perejil, a partir de la cual se determinó la curva de secado y se registraron variables de operación, que pudieran dar cuenta de la presencia del flujo termosifónico en la circulación del agua.

La experimentación consistió en realizar una operación de secado durante de 36 h, utilizando solamente energía solar cuando ésta estuviera disponible. Se registraron temperaturas del agua a la entrada y salida del radiador, del aire caliente en distintos puntos a la salida del radiador y en tres puntos diferentes antes de abandonar la cámara de secado, también se registraron valores de temperatura ambiente y radiación solar sobre el plano del colector. Los registros se tomaron en intervalos de 1 minuto mediante el uso de termocuplas tipo T, un solarímetro y un adquisidor de datos marca Agilent. Los valores de humedad relativa del aire ambiente y temperatura en el exterior y en la cámara de secado se tomaron en forma continua con dos registradores HOBO UX 100-011, colocándose uno de ellos en el exterior del equipo y el otro dentro de la cámara de secado cerca de la salida del aire.

Se dispuso secar aproximadamente 1,4 kg de perejil recientemente cosechado, desprovisto mayormente de los tallos. Fue recolectado al final de la tarde del día anterior al ensayo, y se dejó orear 18 horas, de este modo se partió con una humedad inicial del 85%. El material se distribuyó equitativamente en las cuatro bandejas. El seguimiento del proceso de secado se realizó a partir de muestras testigos, para las cuales se registró la pérdida de humedad en intervalos de tiempo conocidos y determinando materia seca para cada una de ellas, por secado en estufa 104 °C, durante 24 horas. Al iniciar el ensayo, se cargan las cuatro bandejas con perejil, y los recipientes de muestras testigo, tres muestras por bandejas, tal como se muestra en la Figura 8, a los fines de valorar la homogeneidad del secado.

Luego, se le da energía al motor de las bandejas giratorias y al ventilador. La entrada de aire se regula cubriendo parcialmente el área de ingreso de aire al ventilador, aun así, es el caudal de aire, es muy sensible a los vientos presentes durante el ensayo. La velocidad del aire en el secadero fue variable entre 2 y 4 m/s.

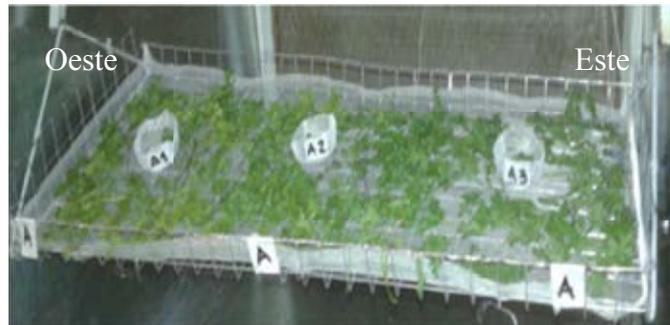


Figura 8. Distribución en las muestras en las bandejas y su orientación respecto del sol.

La toma de datos se realizó en 2 días consecutivos, comenzó a las 9:00 h del 14 de agosto de 2018, y se dio por finalizado a las 21:00 h del día siguiente. En esta época del año, a partir de las 18 h, la radiación sobre plano inclinado decae abruptamente, por lo tanto, a las 18:30 h, de ambos días, se detuvo el flujo de aire y se cerró la cabina de secado. A las 9:00 horas del segundo día, se descubre la cabina y se retoma la operación. A las 18:30 h, se concluye la toma de datos y se cierra la cabina. Sin embargo, las bandejas se retiraron del equipo de secado a las 12:00 h, del tercer día aunque el equipo permanecía cerrado y sin circulación de aire. Se registraron los pesos de las muestras testigo y se colocaron en la estufa.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos recogidos durante el ensayo, se volcaron en gráficos, los cuales se describen a continuación.

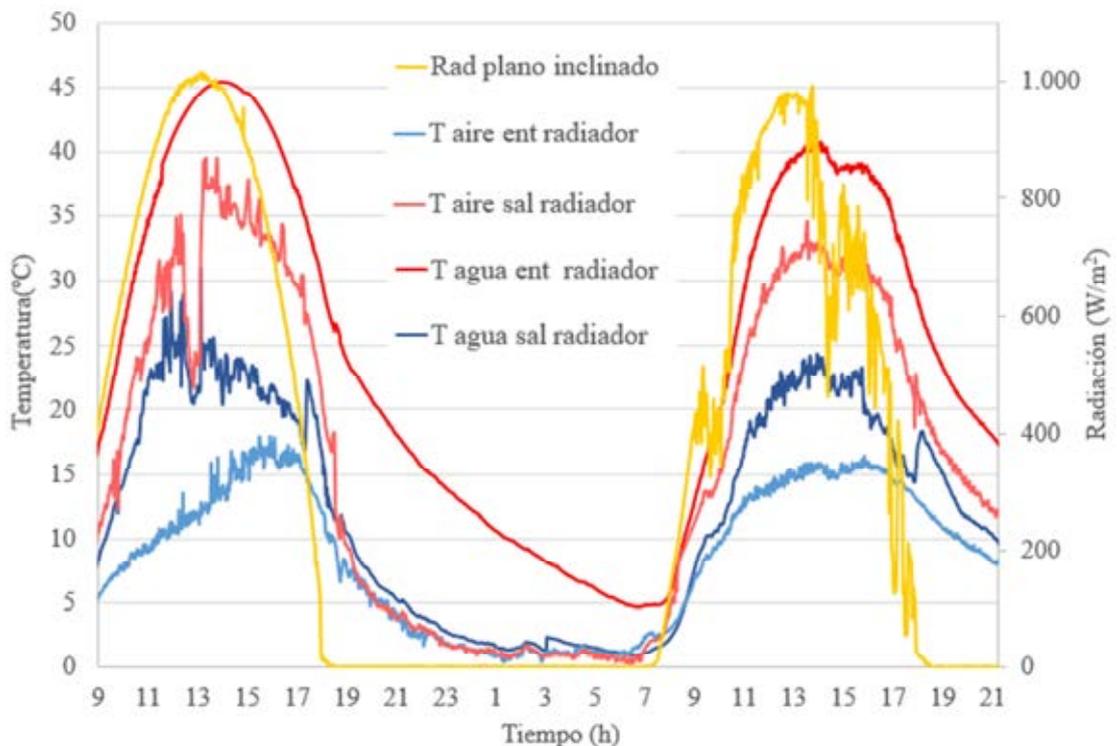


Figura 9. Radiación sobre el plano del colector y temperaturas en el radiador.

En la figura 9, se muestran registros de temperaturas del agua y aire, a la entrada y salida del radiador, siendo el valor de la temperatura del aire a la salida del radiador un promedio de los registros tomados en diferentes puntos a la salida del radiador (figura 11). También se muestra la radiación medida sobre el plano de la superficie del colector.

Puede observarse también en la figura 9, que el aire en su paso por el radiador, consigue un aumento máximo de su temperatura cercano a los 27°C durante el primer día, mientras que el segundo día el salto térmico no supera los 19°C.

En la figura 10, se muestran los registros de temperaturas y humedades relativas del aire medidas en la cabina de secado por los registradores HOBOS. Los valores de velocidad de viento, se tomaron de la página del servicio meteorológico nacional (<https://www.smn.gob.ar/pron%C3%B3stico-extendido/?loc=7007>).

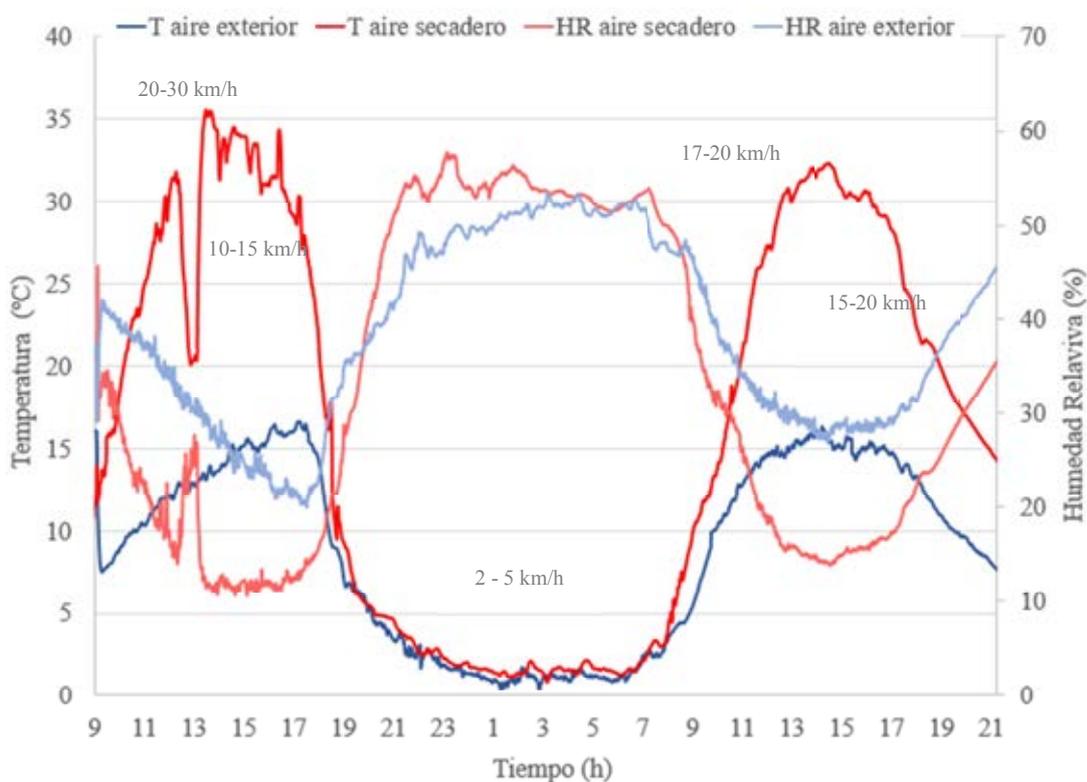


Figura 10 Humedades relativas y temperaturas en la cabina de secado y en el exterior.
Valores de velocidad de viento

Es posible notar en la figura 10 que el aire que abandona el secadero está muy lejos de la saturación, mostrando que hay energía disponible que no está siendo aprovechada para el secado.

Se observa también, que la incidencia de las ráfagas de viento en las temperaturas medidas en el aire es significativa, manifestándose en las variaciones bruscas de los registros de temperatura del aire y del agua a la salida del radiador.

La figura 11, muestra las temperaturas del aire, en nueve puntos cercanos a la superficie del radiador luego de atravesar el mismo en flujo cruzado, poniendo de manifiesto que la zona en la cual la temperatura del aire es mayor, corresponde a las cercanías de la entrada de agua caliente en el radiador y no se reconocen patrones que indiquen un mayor calentamiento del aire en la zona este por la mañana y oeste por la tarde.

Es posible notar que, durante la noche, las temperaturas en los distintos puntos prácticamente se igualan, poniendo de manifiesto que no hay transferencia de calor entre el agua y el aire, debido a que no hay circulación de agua en el radiador.

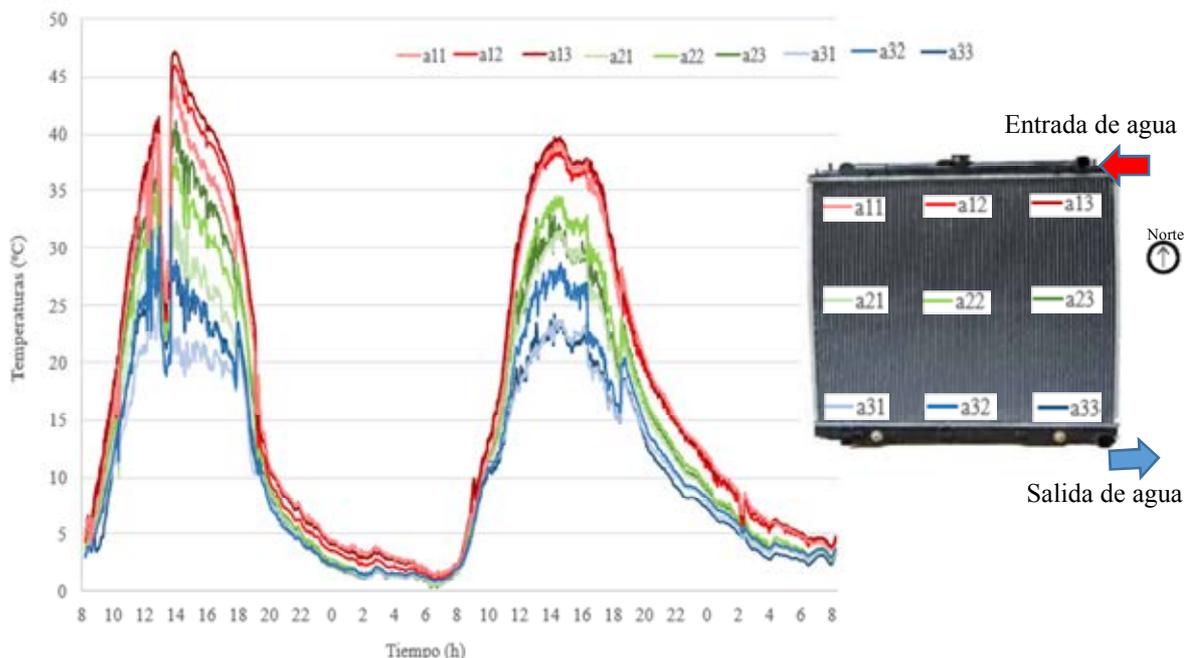
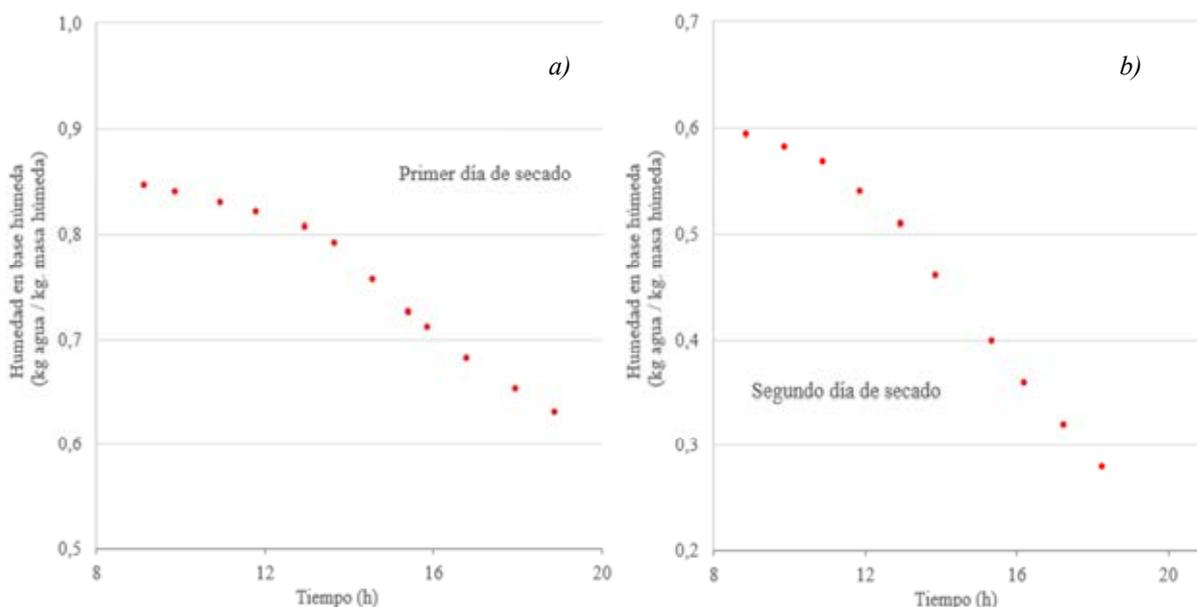


Figura 11. Temperaturas del aire a la salida del radiador en nueve puntos y distribución de los registros de temperaturas en el radiador

A continuación, se muestra las curvas de secado para el perejil en las condiciones de operación. Las figuras 12 a) y b), presentan valores promedio de humedad en base húmeda de las muestras testigo, para el primer y segundo día de la experiencia respectivamente y correspondientes a las horas de sol. Muestran la curva de secado obtenida, advirtiéndose que no tiene un periodo de velocidad constante, y que la velocidad de secado es mayor el segundo día en relación al primero.

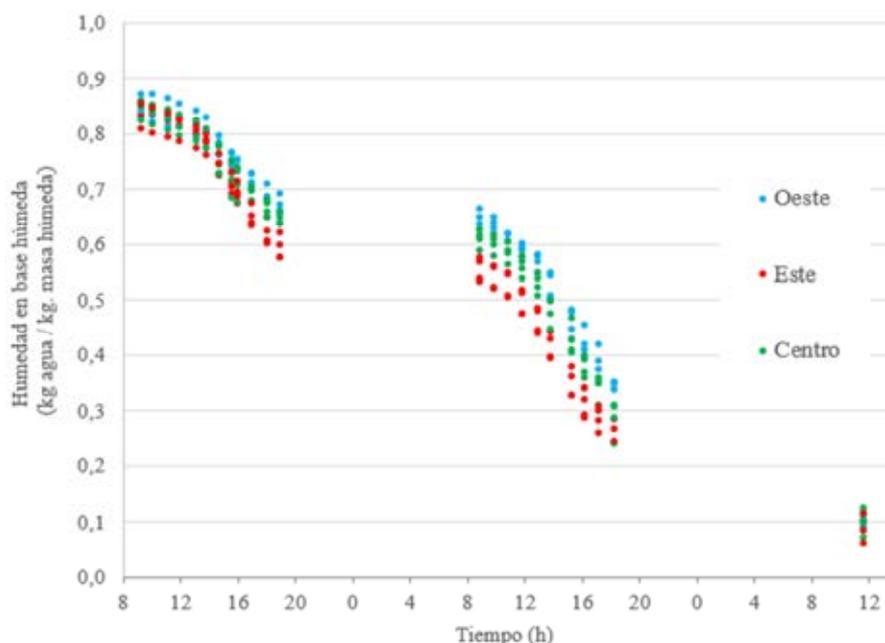


Figuras 12. a) y b) Curvas de secado para el perejil para el primer y segundo día respectivamente

Se observa también que a las 18:30 h del segundo día, cuando se cierra nuevamente el secadero, la humedad alcanzada no es suficiente para un almacenamiento seguro, requiriéndose mayor tiempo de operación. Sin embargo, a las 12 h del tercer día, las muestras son retiradas definitivamente del

secadero conjuntamente con las bandejas, y el valor de humedad promedio final en las muestras es cercano al 10% (9.98% BH).

En la figura 13 se presentan los datos de humedad en base húmeda para las doce muestras de perejil, (tres muestras por bandejas y cuatro bandejas), en función del tiempo de permanencia en el secadero e identificando su posición en las bandejas en relación al norte (figura 8). Durante la noche las bandejas conjuntamente con las muestras quedaron dentro de la cabina de secado, sin circulación de aire.



Figuras 13. Evolución de la humedad en las muestras según su orientación en las bandejas

Los resultados mostrados en la figura 11, están en consonancia con los mostrados en la figura 13, donde es posible observar que la velocidad de secado es mayor para las muestras ubicadas en el sector este de las bandejas, es decir aquellas muestras que al girar la bandeja toman contacto con el aire más caliente.

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos a partir de la experimentación y de la operación del equipo de secado en general, es posible obtener conclusiones, las cuales se detallan a continuación.

A los fines de aumentar el aprovechamiento térmico del aire, debido a que el aire se mantiene en todo momento alejado de la saturación (figura 10), es necesario disminuir el flujo de aire al operar el secadero y/o recircular parcialmente el aire a la salida.

Los registros de temperaturas que se muestran en las figuras 9 y 10, muestran el intercambio térmico entre el agua y el aire que ocurre en el radiador, confirmando la circulación del agua y por lo tanto la presencia de un flujo termosifónico. Sin embargo, de la observación de la figura 11 se concluye, que durante la noche cesa el flujo termosifónico, ya que no ocurre intercambio térmico entre el agua y el aire.

Se comprueba que la tecnología desarrollada es apropiada para calentamiento indirecto del aire y que puede ser aplicada a climatización de ambientes en general.

Por último, se constata que el equipo de secado propuesto constituye un diseño idóneo en relación a la operación de secado aplicado a hierbas aromáticas y medicinales y que su funcionamiento depende solamente del recurso solar disponible.

REFERENCIAS

- Bandoni, A. (2000) Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica. Ed. UNLP. 410 pp.
- Banchero, L., Carballo, S., Telesca, J. (2008) Manual de Secado Solar de especies medicinales y aromáticas para predios familiares. INIA - DIGEGRA – MGAP. ISBN: 978-9974-563-49-0
- Barral, J., Lucchini, J. y Garnica, J. (2017) Cálculo de sistemas de calentamiento de agua activos que utilizan colectores de tubos evacuados del tipo water-in-glass. Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 5, pp. 03.69-03.80, 2017.
- Budihardjo I., Morrison G., Behnia, M. (2007) Natural circulation flow through water-in-glass evacuated tube solar collectors. Solar Energy, Vol. 81, pág. 1460–1472
- Corvalán, R., Horn, M., Román R. y Saravia L. (2000) Ingeniería del Secado Solar, Subprograma VI: Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía. CYTED-D.
- Garnica J., Lema A., Morsetto J., Pontin M. y Lucchini, M. (2016) Evaluación de un Sistema de calentamiento de aire apto para Secado Solar indirecto de Perejil. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 20, pág. 02.01-02.11
- Lema A., Morsetto J., Pontin M. y Medina M. (2017) Secadero solar indirecto para el secado de hierbas. Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 5, pp. 02.35-02.46.
- Lucchini J., Barral J. y Galimberti P. (2007). Estudio de un caudalímetro calorimétrico para mediciones en sistemas Solares termosifónicos de calentamiento de agua. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 11, pag. 08.175 – 08.182.
- Morrison G. L. y D. B. J. Ranatunga (1980) Thermosyphon Circulation in Solar Collectors. Solar Energy, Vol. 24, pp. 191-198.
- Paunero, Ignacio. (2017) Situación actual del cultivo de plantas aromáticas y medicinales en Argentina <https://inta.gob.ar/sites/default/files/intasp-situacion-aromaticas-paunero-2017.pdf>
- Ringuelet J., Barreyro R., Cerimele E., Henning C., Ré M., Mari S., Morales N. y Agrícola S. (2000). Producción de aceites esenciales y hierbas aromáticas deshidratadas como alternativa agroindustrial. Congreso “La Inserción de la Universidad en el Medio Rural”. La Plata. Resúmenes: 1.

ABSTRACT:

The objective of this work was to develop an indirect drying equipment fully supported by solar energy. The air heating system for drying uses a solar collector of evacuated tubes to increase the thermal energy of the water, which is then partially transferred to the air in a water-air heat exchanger. The water flows through the thermosiphon effect in a closed circuit between the solar collector and the heat exchanger, while the air enters the equipment through a fan and passes through the heat exchanger before entering the drying chamber. The electrical requirements of the system are provided by a photovoltaic panel. The developed equipment was tested and the results are presented in graphs. The results show that it is possible to develop a system to obtain an adequate drying, balancing quality of the product and spent time, by using only solar energy

Keywords: indirect drying; aromatic herbs; air heating, thermosyphonic flow.

SIMULACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA SOLAR COLECTADA POR CUERPOS GEOMÉTRICOS ASOCIADOS A FORMAS DE COPA DE ÁRBOL PARA DÍA DE CIELO CLARO USANDO EL MODELO DE BIRD

Germán Salazar^{1*}, Diego Salve^{2}, Pablo Gerbi²**

¹UNSa-INENCO - Avda. Bolivia 5150 - CP A4408FVY - Salta Capital - Salta - Argentina

²INTA IPAF NOA - Ruta Nacional N°9 km 1763 - CP 4622 - Posta de Hornillos - Maimará - Jujuy - Argentina

Recibido 18/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: A nivel mundial se ha investigado ampliamente el efecto de la radiación solar en las plantas. Se han propuesto distintos modelos con el objetivo de simplificar los cálculos necesarios para cuantificar la interacción entre la radiación y el dosel vegetal. En este trabajo se desarrolló un modelo básico, utilizando factores y coeficientes empleados universalmente, que permite estimar la cantidad de energía solar que pueden coleccionar tres cuerpos geométricos, que representan copas de árboles, en cualquier latitud y estación del año. Mediante el modelo para día de cielo claro de Bird se incorporó también el efecto que produce la atmósfera sobre la radiación incidente y sus consecuencias sobre la colección que realizan dichos cuerpos. Si bien es un modelo simple, los resultados obtenidos son de gran interés para comprender la distribución espacial y la eficiencia en la colección de radiación solar asociada a las distintas arquitecturas vegetales.

Palabras clave: Radiación solar, simulación, canopia, cuerpos geométricos, colección, Bird.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es uno de los principales factores ambientales que afectan la vida en nuestro planeta ya que de ella depende el funcionamiento de los procesos fotobiológicos (fotosíntesis, fotoperiodo, fototropismos, etc.). Ésta también afecta a otros factores ambientales (temperatura, humedad relativa, etc.) y ciclos naturales (ciclos diarios, anuales, hídricos, etc.) que finalmente inciden en la distribución de los organismos.

Para que la radiación solar proporcione la energía necesaria para los procesos fisiológicos de las plantas, debe ser interceptada y penetrar en las hojas. Se ha comprobado que la productividad de las plantas depende de la capacidad de la cubierta vegetal (o dosel arbóreo, al que llamaremos también copa o canopia) para interceptar la radiación (Campillo et al. 2012). Se han estudiado distintos parámetros para caracterizar dicha capacidad, uno de ellos es el área foliar disponible. Watson en 1947 describe el índice de área foliar como la relación entre el área total de un lado del tejido foliar y la superficie de suelo, y lo relaciona con la tasa neta de asimilación de la radiación, es decir, la cantidad de biomasa producida por unidad de área foliar y por unidad de tiempo. Sus resultados demostraron una proporción directa entre el índice de área foliar y tasa neta de asimilación.

Además de la cuantificación del área foliar, se han propuesto otros factores a tener en cuenta para caracterizar al dosel arbóreo. Debido a que la distribución de las hojas tiene efectos agronómicos y ecológicos, se han evaluado las implicancias del acimut (Barillot et al., 2011) y del ángulo de inserción de las hojas (Maddonni et al., 2001). Monsi y Saeki (1953) aplicaron una analogía de la ley de extinción de Lambert-Beer a los doseles de las plantas. La ley de Lambert-Beer expresa la atenuación de la radiación al atravesar un medio turbio homogéneo. En dicho medio, el flujo se atenúa en proporción a la distancia óptica relacionada a un coeficiente de extinción (k).

*Investigador Adjunto CONICET

**Becario Doctoral CONICET

Al modelar la relación entre la fracción de radiación fotosintéticamente activa incidente que es interceptada por un dosel y la distribución de las hojas, se observó que un valor alto de k , que implica una distribución horizontal, permite un aumento de la radiación interceptada por las plantas pequeñas. Por el contrario, un menor valor de k puede ser ventajoso para interceptar la radiación cuando el ángulo cenital es grande (invierno, altas latitudes) (Campillo et al., 2012).

Se han desarrollado algunos modelos que emplean cuerpos geométricos para representar los componentes de la canopia (ramas, pecíolos y hojas). Otros utilizan figuras para descomponer la superficie foliar en polígonos regulares y simplificar así los cálculos necesarios para obtener el área (Myneni et al., 1997; Barillot et al., 2011). Pero en ninguno de estos modelos se considera la arquitectura general de la canopia como un factor importante en la colección de radiación debido a la dificultad de generar un modelo geométrico que considere todas las características estructurales de la canopia.

En este trabajo se desarrolló un modelo básico que permite estimar la energía solar captada por cuerpos geométricos asociados a la forma de las copas de los árboles, en cualquier latitud y día del año. Se puso a prueba la idea de que la arquitectura de la copa está relacionada con la cantidad de radiación solar que puede coleccionar. Específicamente se buscó determinar si existen estructuras arbóreas que captan la radiación solar con mayor eficiencia que otras, si esa eficiencia está relacionada con la ubicación geográfica y la época del año, y cuáles son los efectos atmosféricos básicos que afectan a la radiación solar incidente.

MÉTODO

Sin atmósfera terrestre (SinAm)

Se realizó la simulación de la cantidad de energía solar coleccionada por una canopia. Para ello se utilizaron tres cuerpos básicos: un cono, un cilindro y una esfera, que imitan la estructura general de una copa. A continuación se establecen los criterios geométricos de dichos cuerpos y el resto de los condicionamientos temporales y espaciales:

- i) **El área de colección de las tres formas es constante.** Se considera que los tres cuerpos están sobre el suelo, por lo que las superficies inferiores del cono y del cilindro no se incluyen en el cálculo.

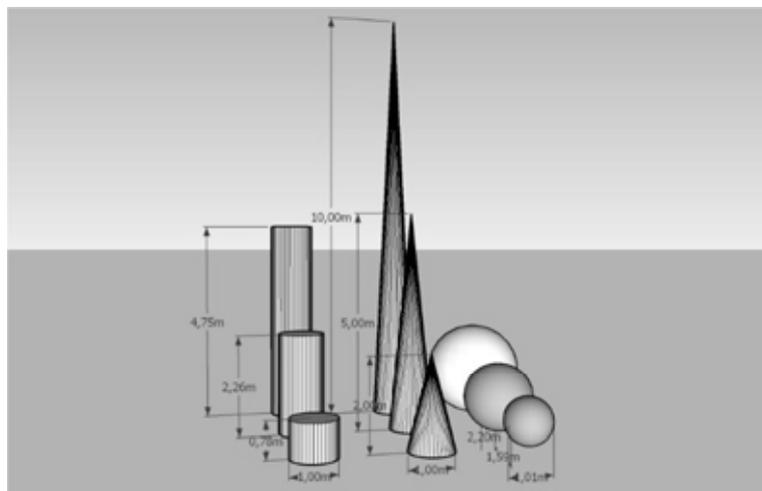


Figura 1 Comparativa de tamaños de las canopias según la relación d/h del cono, manteniendo la misma área para cada caso (1/2, 1/5 y 1/10).

- ii) **El área de colección del cono se usó de referencia para los demás cuerpos.**
- iii) **La relación entre el diámetro de la base (d) y la altura (h) del cono d/h no superó 1/2.** Se consideraron las relaciones 1/2, 1/5 y 1/10.
- iv) **Las dimensiones de la base del cono son iguales a las del cilindro.** Dado que se usó el cono para fijar el área de referencia, consecuentemente se fijó también uno de los parámetros del cilindro (d o h) para que el área total del mismo sea equivalente a la del cono. En este caso, se optó por hacer que el diámetro de la base del cilindro sea igual al del cono.

- v) **Se realizaron los cálculos para tres días julianos específicos:** $n = 172$ (invierno para el hemisferio sur), $n = 264$ (otoño/primavera) y $n = 355$ (verano).
- vi) **Se realizaron los cálculos para cuatro latitudes específicas:** -60° , -40° , -20° y 0° .

Calcular la cantidad de energía solar directa normal incidente en una superficie curva requiere del manejo de técnicas matemáticas que exceden el objetivo de este trabajo. Para simplificar los cálculos se utilizaron aproximaciones usando figuras geométricas sencillas: el cono se aproximó con una pirámide de 40 caras, y el cilindro se aproximó con un paralelepípedo de 40 caras. De esta manera las ecuaciones que se deben aplicar para calcular la irradiación solar colectada son más sencillas por tratarse de superficies planas. Más adelante se analizará el caso de la esfera.

Para determinar la cantidad de energía que llega a un plano se debe establecer: el valor de la irradiancia extraterrestre $I_{0,ext}$, el ángulo cenital θ_z (ángulo entre la normal al suelo y la posición del Sol en el cielo) y el ángulo de incidencia θ (ángulo entre la normal a cada cara y la posición del Sol en el cielo). El valor del ángulo θ_z indica si es de día ($\cos \theta_z > 0$) y el valor del ángulo θ indica si el plano en cuestión está siendo iluminado por el Sol ($\cos \theta > 0$).

El cálculo de la irradiancia solar extraterrestre $I_{0,ext}$ se realizó usando las siguientes ecuaciones (Duffie y Beckman, 2013):

$$\omega = 15 \frac{^\circ}{hora} (12 - HS) \quad (1)$$

donde HS es la hora solar y ω es el ángulo horario,

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2)$$

donde δ es la declinación y n es el día juliano del año,

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \quad (3)$$

donde θ_z es el ángulo cenital y ϕ es la latitud,

$$\gamma_s = \operatorname{signo}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \operatorname{sen} \phi - \operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen} \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (4)$$

donde γ_s es el acimut solar,

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \operatorname{sen} \theta_z \operatorname{sen} \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (5)$$

donde β es la inclinación del plano respecto a la horizontal y γ es el acimut del plano,

$$I_{0,ext} = I_{cs} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (6)$$

donde I_{cs} es la constante solar ($\approx 1367 \text{ W/m}^2$),

$$\text{Radiación colectada} = I_{0,ext} * \cos \theta * \text{Superficie colectora} \quad (7)$$

Debe notarse que al trabajar directamente con la hora solar (HS) en vez de con la hora local estándar (hora reloj), los cálculos se simplifican, ya que no es necesario hacer correcciones por diferencias entre longitud y longitud oficial GMT, ni es necesario aplicar la Ecuación del Tiempo. Así, lo que se hace es calcular la cantidad de energía solar colectada por cada plano, tanto en las caras de la pirámide como en las del paralelepípedo. Para este último se debe considerar también la cara superior como superficie colectora.

Dado que el ángulo entre planos (caras externas) consecutivos siempre es mayor a 180° , no se produce sombreado de una cara sobre otra en ninguno de los cuerpos considerados, por lo que la cantidad total de radiación solar colectada puede calcularse de manera aditiva.

El caso de la esfera es especial, ya que no es posible hacer una aproximación geométrica sencilla de la misma. Sin embargo, su simetría espacial hace posible usar resultados de integrales conocidas. Durante el día, la esfera siempre tendrá iluminada solamente la mitad de su superficie, mientras que la otra estará a oscuras. Por ello se debe calcular la integral de superficie del producto vectorial de la irradiancia $I_{0,ext}$ por el vector normal a cada punto de la superficie iluminada. Dado que los rayos solares pueden considerarse como si siempre estuvieran perpendiculares al hemi-casquete esférico, resulta que dicha integral es igual al producto escalar de la superficie del círculo (proyección a 2D del casquete 3D) por el valor de la irradiancia solar.

Se diseñó una hoja de cálculo que contuviera toda esta información y que realizara los cálculos para cada una de las caras de cada cuerpo geométrico que representa cada canopia. Dicha hoja de cálculo requiere como entrada los parámetros geométricos de la canopia, la latitud y el día del año; y como resultado arroja el valor de irradiación extraterrestre colectada por cada en cada estructura geométrica a lo largo del día ingresado.

Con atmósfera terrestre (ConAm)

Modelar la irradiancia solar en atmósfera requiere considerar la atenuación por interacción con los componentes atmosféricos y el hecho de que, al atravesar la misma, se produce una absorción selectiva (Badescu, 2008). Los componentes más importantes, desde el punto de vista de la atenuación para día de cielo claro, son: el vapor de agua, el ozono, la mezcla de gases y los aerosoles (Gueymard, 1995). Otra variable importante es la presión atmosférica, que está directamente relacionada con la altitud sobre el nivel del mar a la que se supone se realiza el modelado.

Se utilizó el Modelo Simple de Cielo Claro de Bird (Bird y Hulstrom, 1981) para simular los valores de la irradiancia solar directa normal al haz y la irradiancia difusa. El mismo está basado en el trabajo de Leckner (1978) y estima el valor de la irradiancia solar Directa Normal al Haz I_{DN} y el valor de la irradiancia solar Difusa I_D en superficie plana horizontal. La aplicabilidad de la irradiancia I_{DN} es inmediata ya que vectorialmente es igual al caso SinAm ($I_{0,ext}$), solo varía su módulo. Para el caso de la I_D se considera que la misma no posee dirección preferencial (anisotropía) por lo que solo se considera su módulo.

Las ecuaciones postuladas por Bird y Hulstrom, y utilizadas en este modelo para calcular la irradiancia directa ($I_{DN,\lambda}$) en una superficie normal a la dirección del sol para una longitud de onda determinada son:

$$I_{DN,\lambda} = I_{ext,0\lambda} T_{r\lambda} T_{a\lambda} T_{w\lambda} T_{o\lambda} T_{u\lambda} \quad (8)$$

donde $I_{ext,0\lambda}$ es la irradiancia extraterrestre para la distancia media Tierra-Sol para una longitud de onda λ (ya corregida por la distancia Tierra-Sol), y $T_{r\lambda}$, $T_{a\lambda}$, $T_{w\lambda}$, $T_{o\lambda}$ y $T_{u\lambda}$ son las funciones de transmitancia de la atmósfera para una longitud de onda λ para dispersión molecular, atenuación por aerosoles, absorción por el vapor de agua, absorción por el ozono, y absorción por la mezcla uniforme de gases atmosféricos, respectivamente. Para calcular el factor de dispersión molecular (Rayleigh):

$$T_{r\lambda} = \exp\left\{-M' / \left[\lambda^4 \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)\right]\right\} \quad (9)$$

donde M' es la presión corregida de la masa de aire, la que se calcula a partir de

$$M = [\cos\theta_z + 0,15 * (93,885 - \theta_z)^{-1,253}]^{-1} \quad (10)$$

donde θ_z es el ángulo del cenit solar, de donde se define

$$M' = M * P / P_0 \quad (11)$$

donde P_0 es igual a 1013 hPa y P es la presión atmosférica medida en la superficie

Para calcular el factor de atenuación por aerosoles:

$$T_{\alpha\lambda} = \exp(-\beta_n \lambda^{-\alpha_n} M) \quad (12)$$

donde α_n y β_n son valores de turbidez para determinadas longitudes de onda, nótese que la turbidez en la ecuación (12) queda representada por la ecuación de Angstrom (13)

$$\tau_{\alpha\lambda} = \beta_n \lambda^{-\alpha_n} \quad (13)$$

Para calcular el factor de absorción por vapor de agua:

$$T_{w\lambda} = \exp\left[\frac{0,2385\alpha_{w\lambda}WM}{(1+20,07\alpha_{w\lambda}WM)^{0,45}}\right] \quad (14)$$

donde W es el vapor de agua precipitable y $\alpha_{w\lambda}$ es el coeficiente de absorción del vapor de agua para la longitud de onda λ .

Para calcular la absorción por el ozono y la mezcla uniforme de gases:

$$T_{0\lambda} = \exp(-\alpha_{o\lambda} O_3 M_o) \quad (15)$$

donde $\alpha_{o\lambda}$ es el coeficiente de absorción del ozono, O_3 es la cantidad de ozono y M_o es la masa del ozono. Ésta última está dada por la ecuación (16).

$$M_o = \left(1 + \frac{h_o}{6370}\right) / \left[\cos^2(\theta_z) + \frac{2h_o}{6370}\right]^{0,5} \quad (16)$$

donde h_o es la altura de la máxima concentración de ozono.

$$T_{u\lambda} = \exp\left[-\frac{1,41\alpha_{u\lambda}M'}{(1+118,93\alpha_{u\lambda}M')^{0,45}}\right] \quad (17)$$

donde $\alpha_{u\lambda}$ es el coeficiente que combina la absorción y la cantidad de gases.

Para estimar la irradiancia difusa se empleó la ecuación (18), la cual depende de 3 componentes, representados por las siguientes ecuaciones:

$$I_{D,\lambda} = I_{r\lambda} + I_{\alpha\lambda} + I_{g\lambda} \quad (18)$$

donde $I_{D,\lambda}$ es la irradiancia difusa, $I_{r\lambda}$ es la dispersión de Rayleigh, $I_{\alpha\lambda}$ es la dispersión por aerosoles y $I_{g\lambda}$ es la suma de reflexión de la irradiancia por la superficie y el aire.

$$I_{r\lambda} = I_{ext,0\lambda} \cos(\theta_z) T_{0\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{\alpha\lambda} (1 - T_{r\lambda}^{0,95})^{0,5} \quad (19)$$

donde $T_{\alpha\lambda}$ es la transmitancia de la absorción de aerosoles

$$I_{\alpha\lambda} = I_{ext,0\lambda} \cos(\theta_z) T_{0\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{\alpha\lambda} T_{r\lambda}^{1,5} (1 - T_{\alpha s\lambda}) F_s \quad (20)$$

donde $T_{\alpha s\lambda}$ es la transmitancia de la dispersión de los aerosoles y F_s es la fracción de la dispersión por aerosoles.

$$I_{g\lambda} = (I_{ext,0\lambda} \cos(\theta_z) + I_{r\lambda} + I_{\alpha\lambda}) r_{s\lambda} r_{g\lambda} / (1 - r_{s\lambda} r_{g\lambda}) \quad (21)$$

donde $r_{s\lambda}$ es el albedo superficial para la longitud de onda λ y $r_{g\lambda}$ es la reflectividad del cielo para la longitud de onda λ .

Estas expresiones dependen de la longitud de onda λ , por lo que para obtener resultados se deben integrar. Por lo general dicha integración se realiza de manera paramétrica, tal y como lo hace el modelo híbrido de Yang (Yang et al., 2001). Por cuestiones de extensión del artículo, se omitirá mostrar las expresiones paramétricas de integración para cada transmitancia. Sin embargo ha sido mostrada la esencia del modelo que considera la atenuación de la irradiancia solar al atravesar la atmosfera.

RESULTADOS

Antes de mostrar los resultados obtenidos, a continuación se ejemplifica cómo es el uso de las ecuaciones para calcular la radiación solar colectada por un plano inclinado 90° (canopia cilíndrica) con acimut de 0° , para la latitud de -20° , en el mediodía solar del día juliano 355.

$$\omega = 15 \frac{^\circ}{\text{hora}} (12 - 12,00) = 0,00 \text{ Rad}$$

$$\delta = 23,45 \text{ sen} \left(360 \frac{284+355}{365} \right) = -23,45^\circ = -0,409 \text{ Rad}$$

$$\cos \theta_z = 0,94 * 0,92 * 1 + (-0,34 * -0,39) = 0,99 \text{ Rad}$$

Al ser positivo indica que el sol se encuentra por encima del horizonte,

$$\gamma_s = \text{signo}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{(0,99*(-0,34)) - (-0,39)}{0,06*0,94} \right) \right| = 0,000001 \text{ Rad}$$

$$\cos \theta = (0,99 * 0) + (0,06 * 1 * \cos(0,000001 - 0)) = 0,06 \text{ Rad}$$

Al ser positivo indica que el plano está recibiendo radiación solar,

$$I_{0,ext} = 1367 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360*355}{365} \right) = 1411,44 \text{ W/m}^2$$

Por último, la radiación solar colectada al mediodía solar del día juliano 355 por la superficie de acimut 0° e inclinación respecto a la horizontal de 90° en un área de $0,099 \text{ m}^2$ es:

$$1411,44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0,06 * 0,099 \text{ m}^2 = 8,47 \text{ W}$$

El resultado positivo demuestra que en el día juliano y la latitud propuestos, el sol se encuentra por encima del horizonte e ilumina la superficie con el acimut y la inclinación elegidos. Se debe destacar la importancia del día juliano en el numerador de la ecuación (6), ya que al modificarlo, varía la $I_{0,ext}$, la cual es directamente proporcional a la radiación colectada en la ecuación (7). La misma proporción existe con la superficie colectora y el $\cos \theta$. Éste último podría tomar valores más grandes si se modificaran la inclinación y el acimut de la superficie.

En la Fig. 2 se muestran los valores de irradiancia colectada por canopia al realizar las estimaciones para las siguientes relaciones d/h , latitudes y día del año, para el caso SinAm:

- d/h : 1/2, 1/5 y 1/10.
- Latitud: -60° , -40° , -20° y 0° .
- $n = 172, 264$ y 355 .

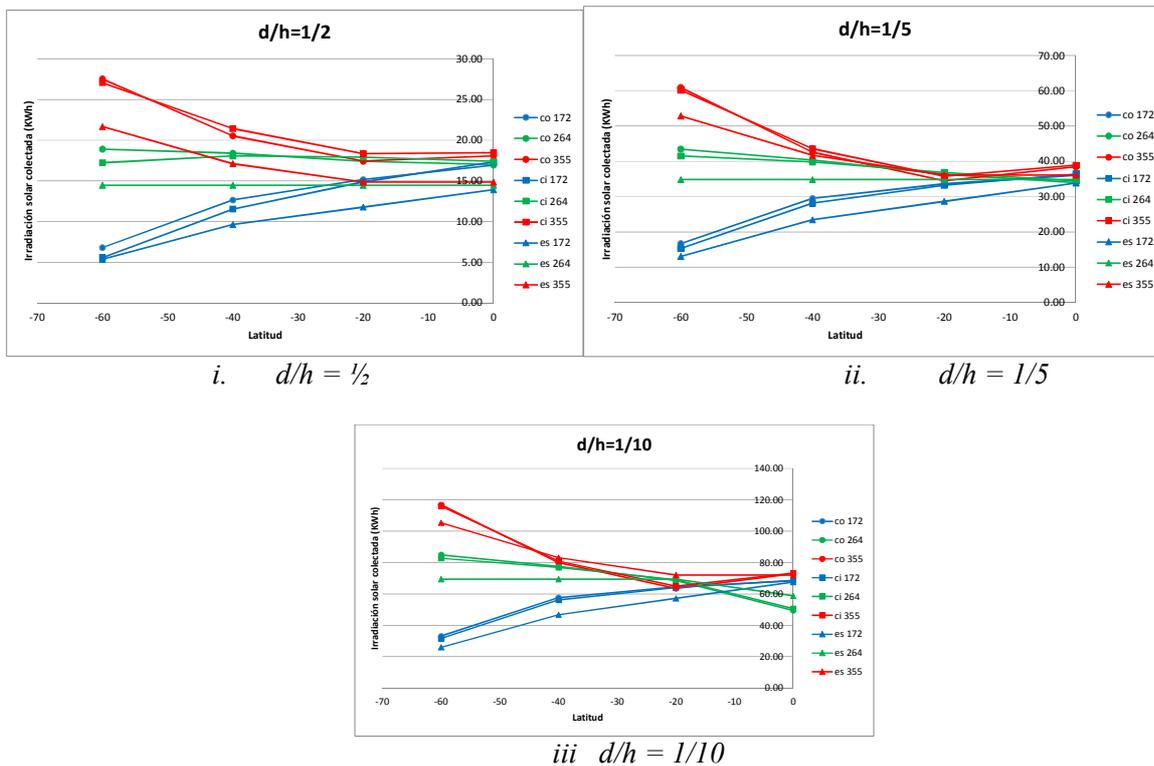


Figura 2. Cantidad de irradiación solar extraterrestre $I_{0,ext}$ ($SinAm$) colectada para diferentes d/h (co = cono, ci = cilindro, es = esfera) durante un día específico del año (172 = 21 jun, 264 = 21 sep y 355 = 21 dic) a diferentes latitudes (-60° , -40° , -20° y 0°). Los valores están expresados en kWh.

Los resultados para el caso ConAm serán discutidos dentro de un solo caso testigo, ya que deberían agregarse a la d/h , latitud y día del año, factores como la altura sobre el nivel del mar, cantidad de agua precipitable y la turbidez atmosférica. Eso generaría la necesidad de graficas demasiado complejas como para extraer información útil de manera rápida.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

$SinAm$

Los efectos de la latitud y el día del año (estación) son evidentes sobre los valores de irradiación colectada diariamente H_{col} , para los distintos valores de d/h . A medida que aumenta el área de colección ($1/2 \rightarrow 1/5 \rightarrow 1/10$), aumentan los valores de irradiación colectados H_{col} . Se puede apreciar en la Fig. 2 que los valores de H_{col} de las tres canopias para el día de invierno ($n = 172$) son casi especulares a los valores para $n = 355$, para cada latitud. Los valores de H_{col} para $n = 264$ son casi constantes para las tres formas, aun variando la latitud.

En la Tabla 1 se detallan los valores astronómicos de duración del día (N) y de máxima altura solar (α) según el día juliano y la latitud.

	Lat. = -60°		Lat. = -40°		Lat. = -20°		Lat. = 0°	
	N (hs)	Max α ($^\circ$)	N (hs)	Max α ($^\circ$)	N (hs)	Max α ($^\circ$)	N (hs)	Max α ($^\circ$)
n = 172	5:30	6,55	9:10	26,55	10:47	46,55	11:59	66,55
n = 264	12:00	30,19	12:00	50,17	12:00	70,13	12:00	88,26
n = 355	18:28	53,44	14:50	73,44	13:12	86,51	11:59	66,55

Tabla 1. Valores de duración del día solar astronómico (N) y máxima altura solar (α) para distintos días del año y para diferentes latitudes.

Puede observarse que en invierno, para las latitudes más australes, la duración del día es menor (horas en que el Sol está sobre el horizonte), y la altura solar es muy baja. A medida que aumenta la latitud (para el mismo día 172), aumenta la cantidad de horas de luz y el ángulo de altura solar. Para el día n 264, asociado a la primavera, el día dura lo mismo para todas las latitudes¹. Pero según la latitud, varía el valor máximo de la altura solar α . Para el día 355 (verano), en la latitud más austral, la duración del día se extiende y el ángulo α es mayor. A medida que la latitud disminuye, lo hace la duración del día e inversamente lo hace α .

Todos estos fenómenos se deben simplemente a que la Tierra tiene inclinado ($23,5^\circ$ aproximadamente), su eje de rotación respecto del plano de la eclíptica.

Se detallarán ahora los resultados respecto de cuál es la estructura que más radiación recibe según latitud y época del año:

- i) En todas las épocas del año, la estructura cónica colecta más energía solar que las demás para Lat. -60° . Para Lat. -40° , la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$ y 264. Para Lat. -20° la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$.
- ii) Para Lat. $= 0^\circ$ la estructura cilíndrica colecta más que las otras dos en todas las estaciones (excepto para $n = 264$ y $d/h = 1/10$, donde la estructura esférica colecta más que las demás).

ConAm

La inclusión de los procesos de atenuación de la irradiancia solar al atravesar la atmósfera implica agregar más variables a tener en cuenta. A priori podemos inferir que, al considerar la interacción de la radiación solar con la atmósfera, el efecto más notable se exprese al amanecer y al ocaso. Esto se debe a que el ángulo con el que inciden los rayos solares hace que casi la totalidad de la irradiancia se atenúe debido a la gran cantidad de masa de aire relativa que deben atravesar.

El modelo de Bird estima el valor la irradiancia total I_T (global), a partir de la adición de la irradiancia directa normal I_{DN} , que atravesó la atmósfera e incide sobre una superficie con la misma dirección que $I_{0,ext}$ (sin atenuar), y la irradiancia solar difusa I_D .

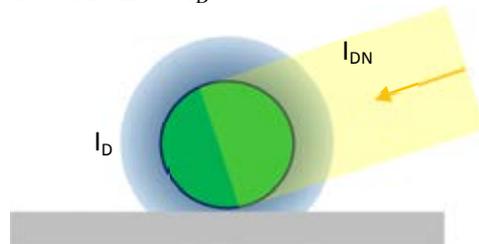


Figura 3. Idealización de la incidencia de la irradiancia solar directa I_{DN} y de la irradiancia solar difusa I_D sobre la canopia esférica para el caso ConAm.

El modelo de Bird define la irradiancia solar difusa solo en el plano horizontal, es decir, paralelo al suelo. La hipótesis es que la radiación difusa, para día de cielo claro, incide de manera paralela a la normal en cada punto de las superficies. Esta hipótesis se abstrae de variaciones producidas por reflexiones, tanto con otras superficies, como de variaciones constitutivas de la atmósfera.

A continuación se mostrarán los efectos que se producen al modificar las variables relacionadas a la transmitancia atmosférica: presión atmosférica, agua precipitable y aerosoles. Las estimaciones se realizarán para un solo día del año (355) y para una sola latitud (-23°). Se mostrarán los efectos que producen variaciones de altitud (a través de modificaciones en la presión atmosférica), cantidad de agua precipitable y turbidez (aerosoles) en el cálculo de la cantidad de energía que colecta una canopia.

En la Tabla 2 se muestran el valor de las variables para cada uno de los seis casos analizados (más el Caso 0). Se analizarán dos altitudes, expresadas como presiones atmosféricas: 0 metros s.n.m. (1013 hPa) y 4000 metros s.n.m. (600hPa). Estas equivalencias se obtienen a partir de información brindada

¹ Ese día se denomina Equinoccio que significa “noche igual”, porque la duración de la noche es igual a la del día (12 hs).

por las tablas de Atmósfera Estándar 1976 (<https://ntrs.nasa.gov/>). La cantidad de agua precipitable representa la cantidad de agua que se obtendría si todo el vapor de agua contenido en una columna vertical de aire con base o sección transversal horizontal unitaria se condensase y precipitase. Para este caso usamos los valores de 4 cm, consistente con un verano suave en Salta Capital ($T = 26^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR} = 70\%$), y un valor extremo de 0 cm (ideal).

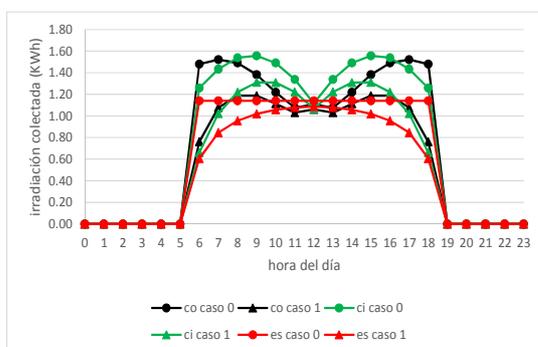
Para el caso de la turbidez, que está asociado a la concentración de aerosoles en la atmósfera, este valor para una atmósfera prístina es aprox. 0,01 (en sitios de gran altura, con ninguna contaminación), mientras que un valor para una atmósfera normal urbana sería de 0,1, como media mensual.

	Patm(hPa)	H ₂ O prec (cm)	Turbidez	Co-SinAm (KWh)	Ci-SinAm (KWh)	Es-SinAm (KWh)	Co-ConAm (KWh)	Ci-ConAm (KWh)	Es-ConAm (KWh)
Caso 1	1013	4	0,01	17,45	18,35	14,84	13,78	14,56	12,21
Caso 2	1013	0	0,01				16,13	17,01	14,27
Caso 3	600	4	0,01				13,97	14,76	12,29
Caso 4	600	0	0,01				16,37	17,26	14,37
Caso 5	600	4	0,1				14,41	15,19	13,11
Caso 6	600	0	0,1				16,84	17,73	15,30

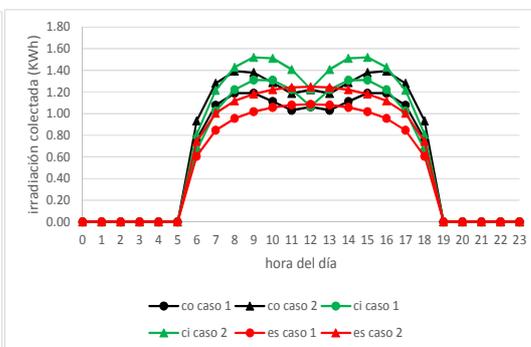
Tabla 2. Descripción de los valores considerados para los seis casos analizados para el día $n=355$ y latitud de -23° . Se muestran también los valores de irradiación colectados por cada canopia en los casos sin atmósfera (SinAm) y con atmósfera (ConAm), para cielo claro.

Básicamente se van cambiando los valores de las variables atmosféricas de manera de evaluar su impacto en la irradiación colectada. Llamaremos Caso 0 a los valores SinAm de la Tabla 2. Así, el Caso 0 respecto del Caso 1 es 21 % mayor para Co y Ci, mientras que es 18 % para Es. Esto puede verse en la Fig. 4i. Estas diferencias se deben a la masa de aire relativa atravesada al inicio y final del día.

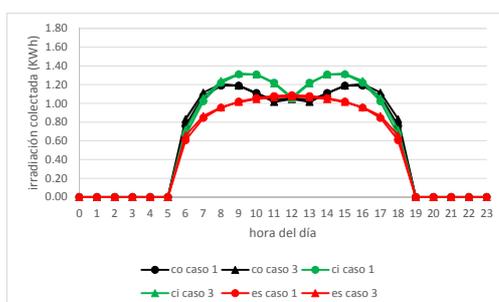
La reducción del vapor de agua (Fig. 4ii) produce una variación de aproximadamente 15 % en la irradiación colectada para todas las canopias. Lo mismo sucede para Fig. 4iv y Fig. 4v. Es decir que el efecto del vapor de agua es importante, cualquiera sea la altitud.



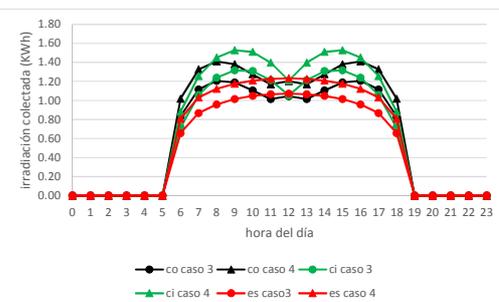
i) Caso 0 vs Caso 1.



ii) Caso 1 vs Caso 2.



iii) Caso 1 vs Caso 3.



iv) Caso 3 vs Caso 4.

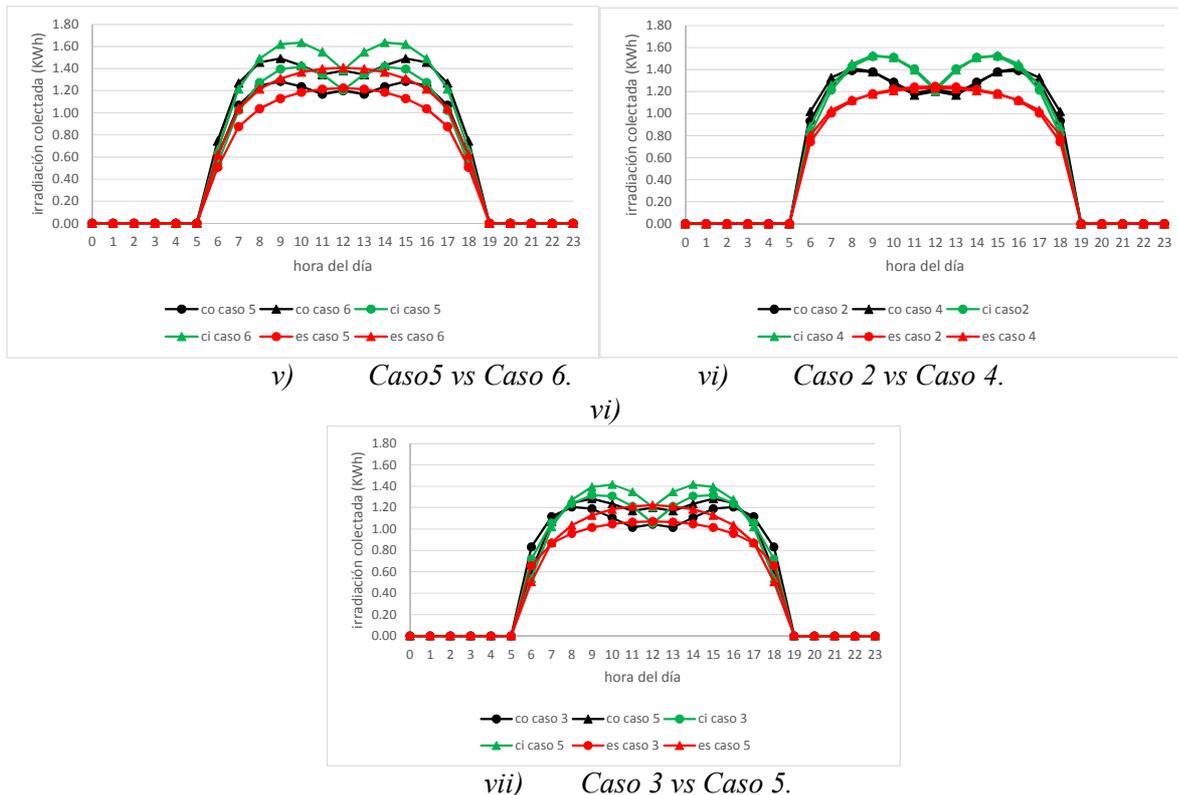


Figura 4. Comparación, en base horaria, de la energía colectada por cada estructura arbórea para distintos casos descritos en la Tabla 2.

Las comparaciones de las Fig. 4iii y 4vi indican que la variación de la altitud tiene efecto despreciable frente a los atribuidos a la variación de la cantidad de vapor de agua. El porcentaje de variación es de 1 % para todas las canopias. Para el caso de la turbidez, resulta notable la variación de irradiación colectada por la esfera (7 %) respecto de las otras (aprox. 4 %). Esta variación se debe posiblemente a la aproximación metodológica usada para calcular la cantidad de irradiancia difusa que llega a las canopias, es decir, no se considera la parte inferior de la pirámide ni del paralelepípedo.

Sin embargo, el efecto de aumentar la altitud afecta los valores de las variables meteorológicas más simples, como la temperatura y la humedad relativa. Esto se debe a que a medida que ascendemos, la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera disminuye. De esa manera, salvo situaciones muy particulares, no será frecuente encontrar a 4000 metros de altura una cantidad de vapor de agua de 4 cm, sino valores menores a 1 cm.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una hoja de cálculo para determinar la cantidad de irradiación solar que llega a canopias arbóreas que se han aproximado a tres cuerpos geométricos sencillos. Los cuerpos geométricos se abstraen utilizando “facetamiento”, salvo en la esfera. Se diferencian dos casos físicos: sin atmósfera (SinAm) y con atmósfera (ConAm) utilizándose el modelo de Bird para este último caso. Se analizaron tres posibles tamaños para este estudio.

Para el caso SinAm, en todas las épocas del año, la estructura cónica colecta más energía solar que las demás para Lat. -60°. Para Lat. -40°, la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$ y 264 . Para Lat. -20° la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$. Para Lat. = 0° la estructura cilíndrica colecta más que las otras dos en todas las estaciones (excepto para $n = 264$ y $d/h = 1/10$, donde la estructura esférica colecta más que las demás).

Para el caso ConAm, se estudia cómo la variación de los factores atmosféricos que atenúan la radiación solar (vapor de agua y aerosoles) influye sobre el valor incidente en la superficie de la canopia. Para el caso testigo se detecta una variación del 15 % para variaciones de vapor de agua y de 7 % a 4 % para el caso de variaciones de turbidez atmosférica. Variaciones de altitud no afectan significativamente, por si solas, la cantidad de radiación que colectan las canopias. En el futuro se

agregará a este modelo la analogía de transmitancia en medios turbios para simular la cantidad de radiación solar que consigue atravesar una canopia, lo que permitirá determinar cómo afecta a plantas circundantes.

NOMENCLATURA

Variable	Símbolo	Unidad
Irradiancia extraterrestre	$I_{0,ext}$	W/m^2
Ángulo cenital	θ_z	Radianes
Ángulo de incidencia de la irradiancia	θ	Radianes
Constante solar	I_{cs}	W/m^2
Día juliano del año	n	
Latitud	ϕ	Radianes
Declinación del eje terrestre	δ	Radianes
Ángulo horario	ω	Radianes
Inclinación del plano respecto a la horizontal	β	Radianes
Acimut solar	γ_s	Radianes
Acimut del plano receptor	γ	Radianes
Hora Solar	HS	decimal
Irradiancia total	I_T	W/m^2
Irradiación colectada diaria	H_{col}	kWh
Altura solar	α	grados
Irradiancia directa normal	$I_{d\lambda}$	W/m^2
Irradiancia extraterrestre para longitud de onda λ	$H_{0\lambda}$	
Longitud de onda	λ	Nm
Factor de corrección para distancia Tierra-Sol	D	
Factor de dispersión molecular	$T_{r\lambda}$	
Factor de atenuación por aerosoles	$T_{a\lambda}$	
Factor de absorción por el vapor de agua	$T_{w\lambda}$	
Factor de absorción por el ozono	$T_{o\lambda}$	
Factor de absorción por la mezcla uniforme de gases atmosféricos	$T_{u\lambda}$	
Presión corregida de la masa de aire	M	hPa
Presión medida en la superficie	P	hPa
Vapor de agua precipitable	W	cm
Factores de turbidez atmosférica	α_n y β_n	
Coefficiente de absorción de vapor de agua a longitud de onda λ	$\alpha_{w\lambda}$	
Coefficiente de absorción del ozono	$\alpha_{o\lambda}$	
Cantidad de ozono	O_3	Atm.cm
Masa del ozono	M_o	
Altura de la máxima concentración de ozono	h_o	km
Coefficiente que combina absorción y cantidad de gases	$\alpha_{u\lambda}$	
Irradiancia difusa	$I_{s\lambda}$	W/m^2
Dispersión de Rayleigh	$I_{r\lambda}$	
Dispersión por aerosoles	$I_{a\lambda}$	
Suma de reflexión de la irradiancia por la superficie y el aire	$I_{g\lambda}$	
Transmitancia de la absorción de aerosoles	$T_{aa\lambda}$	
Transmitancia de la dispersión de los aerosoles	$T_{as\lambda}$	
Fracción de la dispersión por aerosoles	F_s	
Albedo superficial para la longitud de onda λ	$r_{s\lambda}$	
Reflectividad del cielo para la longitud de onda λ	$r_{g\lambda}$	

REFERENCIAS

- Badescu, V. (2008). *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface. Recent Advances*. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Barillot, R., Louarn, G., Escobar-Gutiérrez, A., Huynh, P., Combes, D. (2011). How Good Is the Turbid Medium-Based Approach for Accounting for Light Partitioning in Contrasted Grass-Legume Intercropping Systems? *Annals of Botany* 108 (6): 1013-24.
- Bird, R. y Hulstrom, R. (1981). *A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*. Solar Energy Research Institute. Golden, Colorado.
- Campillo, C. Fortes, R. Prieto, M. (2012). *Solar Radiation Effect on Crop Production*, Solar Radiation, Prof. Elisha B. Babatunde (Ed.).
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley.
- Gueymard C. (1995). SMARTS2, A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Florida Solar Energy Center. University of Central Florida.
- Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface - Elements of a model. *Solar Energy*, Vol. 20. pp. 143-150. Pergamon Press.
- Maddoni, G.A., Chelle, M., Drouet, J.-L., Andrieu, B. (2001). Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: simulations and crop measurements. *Field Crops Research* 70. pp. 1-13.
- Monsi, M., y Saeki, T. (1953). The light factor in plant communities and its significance for dry matter production. *Japanese Journal of Botany*, 14(1), 22-52.
- Myneni, R.B., R. Ramakrishna, R. Nemani, y S.W. Running. (1997). Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed Par Using Radiative Transfer Models». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35 (6): 1380-93.
- <https://ntrs.nasa.gov/>. Tablas de Atmósfera Estándar 1976. NASA Technical Reports Server.
- Watson, D.J. (1947). Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Annals of Botany, New Series*, Vol. 11, No. 41, pp. 41-76
- Yang, K, Huang GW, Tamai N (2001) A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* 70 (1),pp 13-22.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONICET por el otorgamiento de una Beca Doctoral para Temas Estratégicos 2017 al Ing. Diego Salve.

ABSTRACT: The effect of solar radiation on plants has been widely investigated worldwide. Several models have been developed to simplify the necessary calculations to know in detail the interaction of the radiation and the vegetal canopy. In this work a model was developed using universal factors and coefficients, which allows simulating the amount of solar radiation that can collect 3 geometric bodies which represent different canopies in any part of the year and in any latitude. The effect produced by the atmosphere on the incident radiation and on the collection made by these bodies was achieved through the application of Bird's clear sky day model. Although it is a simple model, the results obtained are of great interest to understand the spatial distribution and efficiency in the collection of solar radiation associated with different plant architectures.

Keywords: Solar radiation, simulation, canopy, geometric bodies, collection, Bird.

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SECADERO SOLAR DIRECTO PASIVO MEDIANTE SIMUSOL

A. Salvo¹, P. Dellicompagni², N. Sarmiento³, J. Franco⁴, R. Echazú⁵

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de Salta (UNSa), Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.
Tel. 0387-4255579 Cel. 0387-154030921. E-mail aienweni@gmail.com

Recibido 12/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: Este artículo presenta resultados experimentales y de simulación de un de secador solar directo pasivo. Se construyó un deshidratador de caja directa que se ensayó en condiciones reales de funcionamiento para el secado de bananas. La medición de los parámetros experimentales fue automatizada mediante un dispositivo Raspberry Pi construido y programado para tal fin. Se simuló en SIMUSOL y se desarrolló el modelo en software libre DIA. Se obtuvo un muy buen ajuste entre los datos medidos y los logrados con SIMUSOL. Los primeros resultados evidencian que en general el modelo de simulación propuesto funciona adecuadamente y permite continuar trabajando sobre el mismo para incorporar aquellos ajustes pendientes.

Palabras Claves: Secado solar de bananas, deshidratador pasivo, simulación, secadero solar pasivo, SIMUSOL.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se observa una demanda creciente de alimentos asociada a un importante cambio del estilo vida en la población mundial, lo que ha generado la existencia de nuevas preferencias asociadas a la elección de alimentos más saludables, y de mayor calidad nutritiva (Yahia et al., 2001), así como nuevas exigencias por parte de los consumidores en cuanto a la producción de alimentos cuyas prácticas y manejos permitan que los mismos sean inocuos para la salud.

La necesidad creciente de determinados alimentos se da simultáneamente con una producción y productividad limitadas, condicionadas por las pérdidas existentes de los mismos, ocasionadas por múltiples factores como ser, cuestiones de infraestructura, elecciones tomadas al momento de producir, desinformación, ataque por insectos y/o microorganismo, etc.

Dichas pérdidas se dan a lo largo de todo el ciclo productivo. Las que se suceden durante la pos-cosecha suelen ser mayores en zonas tropicales y sub-tropicales por las condiciones climáticas prevalecientes (Yahia et al., 2001).

Lo antedicho estimula, principalmente entre la producción de alimentos perecederos, a buscar nuevos métodos de conservación y/o a la mejora de aquellos ya existentes entre los que se encuentra el secado solar, el cual sigue siendo “aún el proceso agrícola más utilizado en los países iberoamericanos” (Espinoza et al., 2010).

¹ Becaria Doctoral CONICET

² Becario Doctoral CONICET

³ Becaria Doctoral CONICET

⁴ Investigadora Adjunta CONICET

⁵ Técnico investigador del INENCO

El presente trabajo surge en el marco del proyecto de investigación presentado en el trabajo Salvo et al. (2017) el cual plantea el deshidratado solar como una alternativa en la región tropical y sub-tropical de las provincias de Salta y Jujuy para la conservación de los excedentes de frutas que tienen los pequeños y medianos productores en dicha zona.

Para poder mejorar la eficiencia de los equipos y evaluar qué parámetros afectan de manera importante al proceso de secado, se realizó una simulación del proceso. Se presentan a continuación el diagrama realizado en DIA de un deshidratador de caja directa y la simulación utilizando SIMUSOL, la cual fue validada experimentalmente, utilizando para la medición de los parámetros en el secadero un dispositivo Raspberry Pi construido y programado para tal fin.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del secadero

La figura 1 muestra el esquema del deshidratador con sus dimensiones. El mismo se construyó utilizando para las paredes tableros de madera prensada y una cubierta de policarbonato alveolar inclinada 27°. En la parte inferior del mismo se colocó chapa galvanizada. Los orificios de entrada y salida del aire tienen una superficie de 75 cm² habiendo tres de entrada y tres de salida. La bandeja se encuentra a una altura de 20 cm desde la parte inferior de la caja siendo la misma una malla plástica.

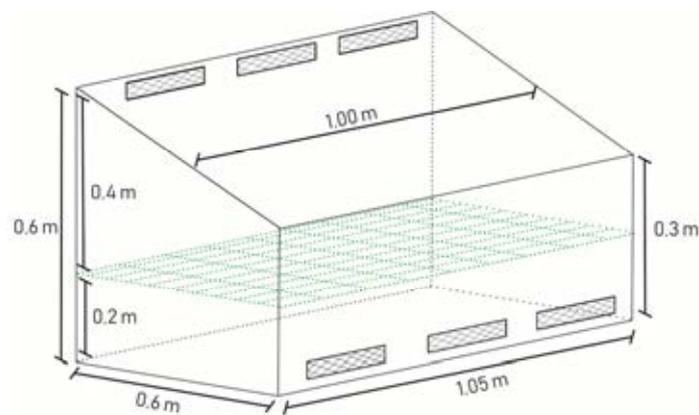


Figura 1. Descripción del secadero directo tipo caja

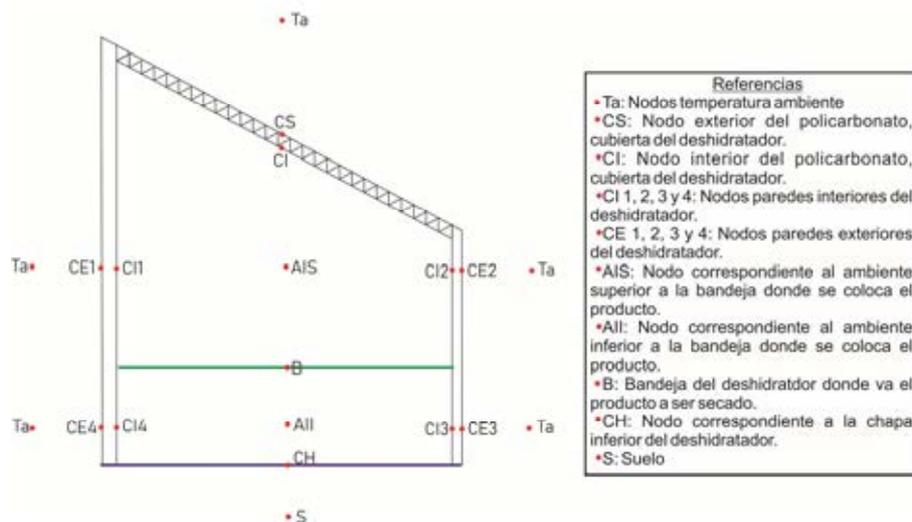


Figura 2. Ubicación de los nodos para la realización del diagrama en DIA.

En la figura 2 se pueden observar los nodos que fueron considerados para la realización del diagrama mediante la utilización del software DIA. Se encuentran detallados en la figura 3 los mecanismos de transferencia térmica radiativas, conductivas y convectivos contemplados en la simulación del circuito térmico.

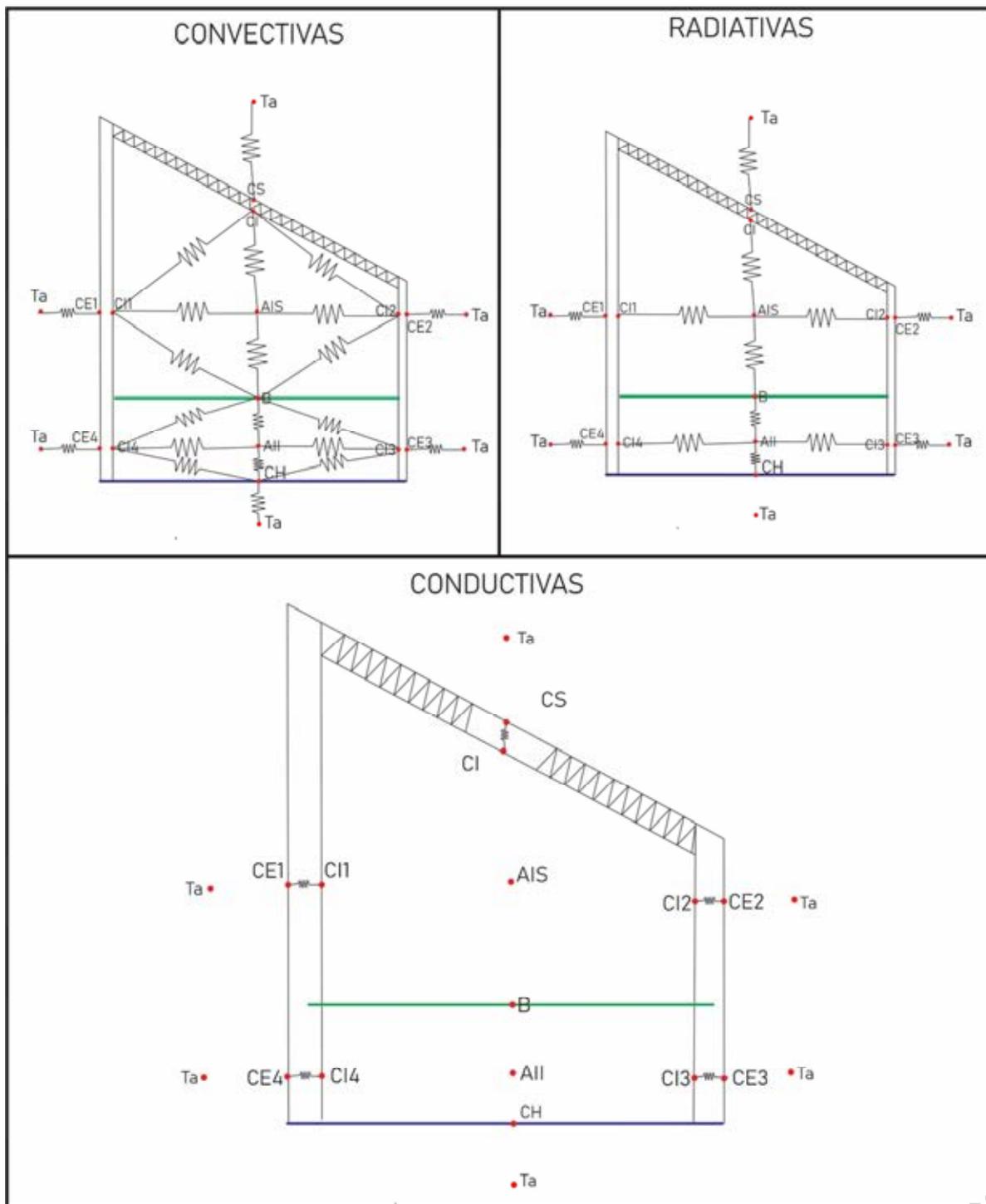


Figura3. Resistencias conductivas, convectivas y radiativas consideradas.

Las figuras 4 y 5 muestran el diagrama final con el cual se corrió la simulación, es importante mencionar que dicho modelo fue elaborado considerando las siguientes hipótesis.

- ❖ El flujo de calor de pérdida hacia el exterior a través de la envolvente del secadero se realiza de manera perpendicular a las paredes, no habiéndose considerado las paredes laterales del mismo. Vale decir que el esquema de pérdida se plantea en un corte transversal del secadero.
- ❖ Se consideran homogéneos los materiales con que está construido el secadero. Por lo que los parámetros térmicos involucrados en las transferencias de calor (coeficientes conductivos son constantes y responden a modelos lineales).

- ❖ El flujo de aire en el interior del recinto por encima y por debajo de la placa que contiene el producto, es uniforme y laminar. No se consideran efectos de vórtices y de pérdida de carga en el flujo al atravesar el producto.
- ❖ En el presente modelo no se consideró el efecto de enfriamiento evaporativo por cesión desde el producto al aire en circulación; por lo tanto el modelo de transferencia térmica por evaporación no ha sido tenido en cuenta.
- ❖ No se tuvieron en cuenta reflexiones en las paredes internas. La transmitancia del policarbonato se consideró en un valor promedio e independiente del ángulo de incidencia solar.
- ❖ No se tuvo en cuenta el modelo de pérdida conductiva hacia el suelo, suponiendo que la temperatura de fondo del secadero es igual a la temperatura ambiente.
- ❖ Las características emisivas de la superficie del producto se consideraron invariables durante el proceso de secado.

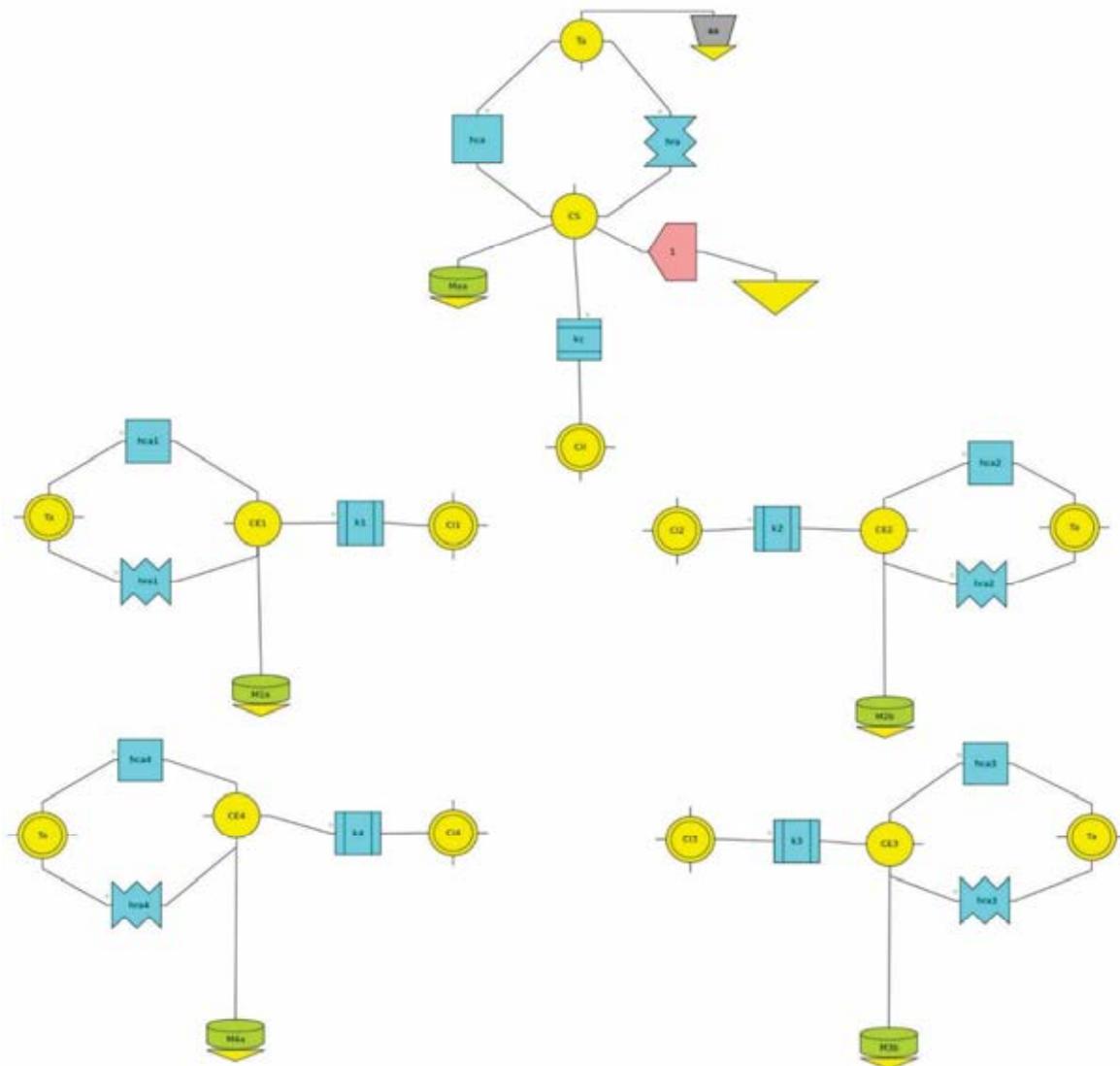


Figura 4. Modelo de transferencia térmica hacia el exterior.

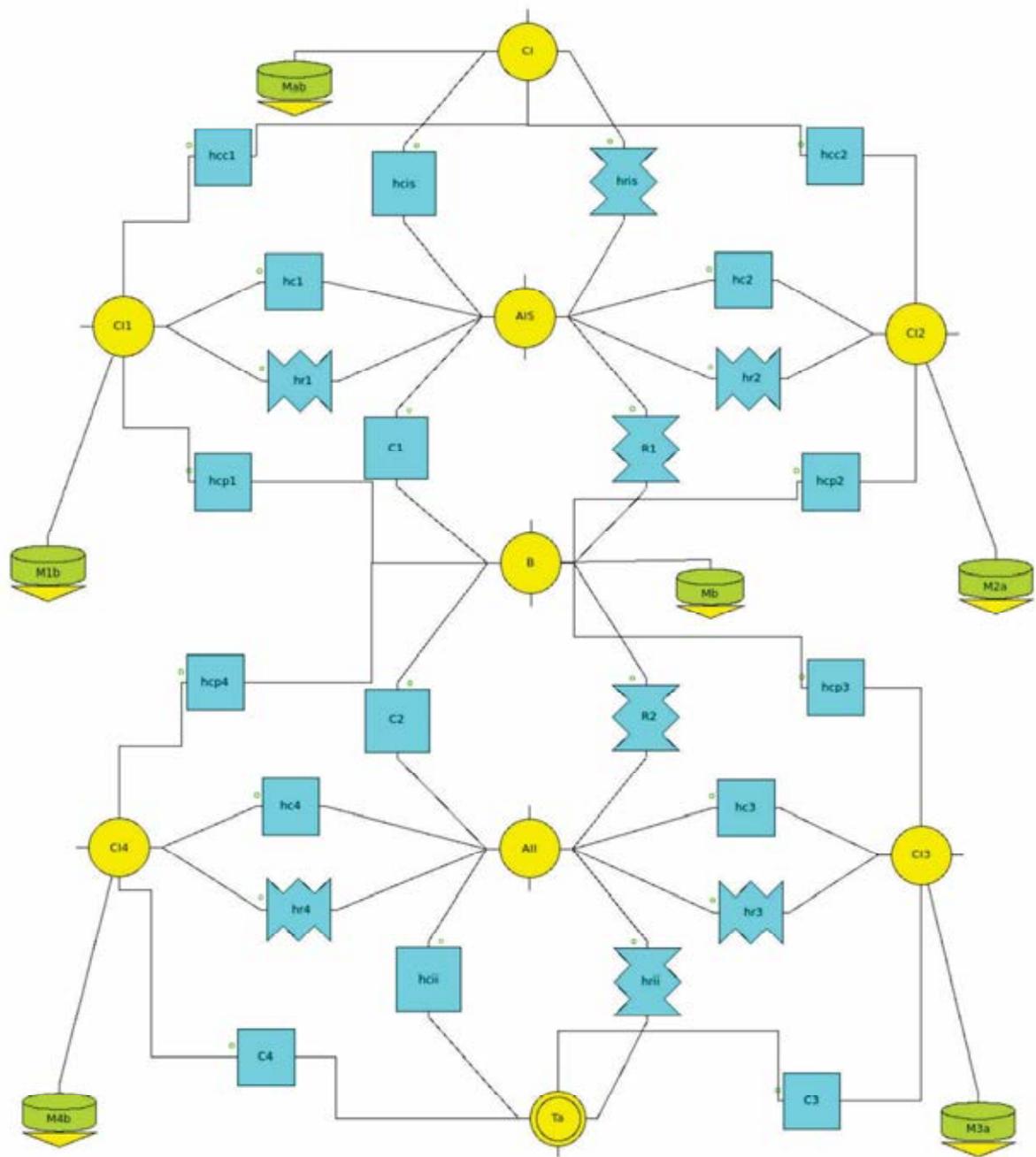


Figura 5. Modelo de transferencia térmica en el interior.

Sistema de medición

La toma de datos se realizó secando bananas. Primero se determinó en laboratorio la curva de secado característica mediante la deshidratación de rodajas de 0,5 mm de espesor en un horno eléctrico a 60 °C hasta alcanzar el peso constante.

En la experiencia en campo de la deshidratación de bananas se midió radiación en el plano horizontal y en el plano del colector con un solarímetro HT204 Solar Power Meter. Para la humedad relativa y la velocidad del flujo de aire a la entrada y salida del deshidratador se utilizó un anemómetro de hilo caliente TES 1341. Se realizó el seguimiento del peso de la muestra utilizando una balanza digital cuya precisión es de 0,01 g.

Para la medición de la temperatura y humedad ambiente y en el interior en la zona de la bandeja con el producto, se desarrolló un sistema basado en la microcomputadora Raspberry Pi conectada a dos sensores de temperatura y humedad DHT11 (ver figura 6) construida específicamente para éste uso y descrita en el siguiente apartado con mayor profundidad.

Los datos experimentales fueron procesados y comparados con el modelo simulado de forma tal de contrastar los datos experimentales y los obtenidos a partir de SIMUSOL.



Figura 6. Raspberry Pi registrando las mediciones

Se determinó el coeficiente de correlación, el %RMSE -error cuadrático medio relativo- y el %MBE -sesgo medio relativo- (Raichijk, 2009) para evaluar la precisión de la simulación.

Descripción del microcomputador Raspberry Pi

La Raspberry Pi fue lanzada en 2014, con un procesador Broadcom modelo BCM2836 con cuatro núcleos y de 700 MHz a 900 MHz. Posee VideoCore IV como placa gráfica y 1 GB de memoria compartida con la gráfica. Posee cuatro puertos USB y 40 pines de propósito General. Los puertos con entradas/salidas de propósito general (General Purpose Input/Output: GPIO) permiten interactuar con diversos componentes electrónicos. Se utilizaron dichos puertos para la conexión de los sensores. La Raspberry Pi a su vez se encuentra conectada a una red ethernet mediante un conector RJ45 para facilitar el comando del microcomputador así como la toma de datos. A su vez, la Raspberry es alimentada mediante un conector microUSB y un cargador de celular de 5,0 V y 700 mA.

El sistema operativo que comanda la Raspberry Pi es una distribución linux, el fabricante ofrece diversas opciones adaptadas a la plataforma ARM en su sitio web (Debian, Archlinux, Fedora entre otros). En este caso se optó por utilizar Raspbian, dicha versión está basada en Debian 7 (wheezy) e incluye las utilidades básicas del sistema operativo, un escritorio gráfico con muy pocos requerimientos de hardware LXDE y algunas opciones para la programación: un entorno de desarrollo para Python (IDLE) y el compilador GCC para el lenguaje C. Al tratarse de una distribución derivada de Debian, con sus correspondientes repositorios accesibles en Internet se puede obtener más de 35.000 paquetes de software de la distribución (Hoyos et al., 2014).

Es importante destacar la excelente relación costo/beneficio de la Raspberry Pi, así como su flexibilidad y la posibilidad de adecuación tanto a nivel hardware como software de acuerdo a las específicas necesidades del usuario. Además, se puede utilizar para diversas aplicaciones como la domótica y control o como una diminuta computadora personal.

En cuanto al lenguaje de programación, se decidió utilizar Python, como lenguaje de alto nivel, para garantizar la portabilidad del código a distintas plataformas y la legibilidad de dicho código, lo que posibilita la colaboración del equipo. El lenguaje de programación Python nació como una herramienta para la enseñanza de la programación, sin embargo fue adoptado para el desarrollo de software en general alcanzando su auge en los últimos años. Es un lenguaje multiparadigma, es decir, se pueden utilizar varios estilos de programación: orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional.

El programa de control de mediciones, desarrollado en Python, emplea las siguientes librerías siguientes:

- ❖ Time y OS para el control del reloj.
- ❖ RPi.GPIO para el control de los sensores.

Este programa fue diseñado para alojar los datos tanto en una memoria USB como en la memoria interna de la Raspberry Pi. Esta característica, simplifica la portabilidad de los datos evitando el ingreso a la microcomputadora mediante ssh.

Los archivos de medida tienen formato de tabla con cuatro columnas divididas por comas tal como se observa en la tabla 1.

Fecha	Hora	Temperatura Sensor 1	Humedad Sensor 1	Temperatura Sensor 2	Humedad Sensor 2
Dia.mes.año	Hora.minutos.segundos	Decimales separado por coma			

Tabla 1. Formato de los archivos de medida generados por Raspberry Pi

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la construcción de la curva de secado de banana se obtuvo la que se observa en la figura 7 mediante la cual se pudo estimar que el proceso de secado de la muestra de 300,5 gr debiera alcanzar los 85,34 gr para considerar el deshidratado óptimo en cuanto a la humedad que debe tener la banana para poder ser conservada. El peso final de la muestra fue de 84,8 gr considerándose exitoso el proceso.

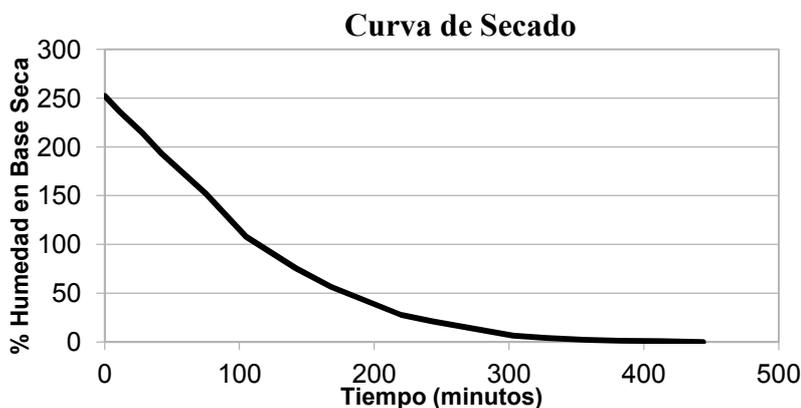


Figura 7. Curva de secado de la banana

El proceso total duró aproximadamente 38 horas, estuvo fuertemente condicionado por el hecho que al segundo día se nubló, durante el cual si bien el producto disminuyó 0,2 gr, permaneció prácticamente estable en cuanto a sus condiciones de humedad. La radiación disponible durante todo el proceso se puede ver en la figura 8, donde se ve claramente la disminución durante el segundo día del proceso.

Obtenidos los datos experimentales, los mismos fueron cargados dentro del diagrama realizado en DIA como se observa en las figuras 9 y 10 donde se pueden ver las tablas construidas para la simulación.

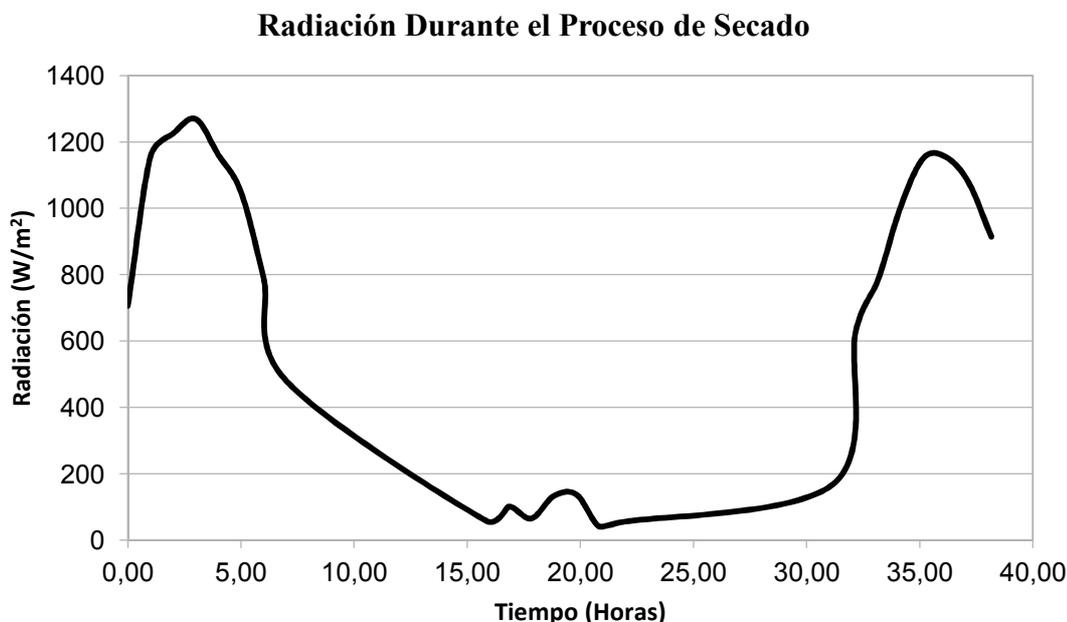


Figura 8. Radiación medida durante el proceso de secado.

tiempo	iniciales				
38 horas	tempCS=tempCI=20	tempC1=tempCE1=22.8	tempC2=tempCE2=21.8	tempC3=tempCE3=21.8	tempC4=tempCE4=22.8
	tempB=23.4				

resultados	TablaPMp	TablaRad	TablaTamb	TablaVo	TablaVi
tempB	#rep=5	#rep=5	#rep=5	#rep=5	#rep=5
tempTa	factores=3600,1	factores=3600,1	factores=3600,1	factores=3600,1	factores=3600,1
j1	0,0.301	0,706	0,20	0,0.01	0,0.05
PMp	1,0.216	1,1156	1,22	1,0.01	1,0.04
	2,0.167	2,1225	2,24	2,0.01	2,0.04
	3,0.143	3,1269	3,26	3,0.01	3,0.01
	4,0.116	4,1161	4,28	4,0.01	4,0.01
	5,0.103	5,1049	5,36	5,0.01	5,0.05
	6,0.095	6,790	6,31	6,0.02	6,0.01
	7,0.093	7,480	7,28	7,0.2	7,0.02
	16,0.091	16,58	16,15	16,0.01	16,0.02
	17,0.090	17,101	17,16	17,0.01	17,0.03
	18,0.090	18,65	18,14	18,0.01	18,0.01
	19,0.090	19,133	19,14	19,0.03	19,0.01
	20,0.090	20,137	20,15	20,0.01	20,0.01
	21,0.089	21,41	21,14	21,0.01	21,0.01
	22,0.090	22,54	22,14	22,0.03	22,0.01
	31,0.088	31,168	31,9	31,0.01	31,0.01
	32,0.089	32,627	32,12	32,0.01	32,0.01
	33,0.087	33,786	33,14	33,0.01	33,0.01
	34,0.087	34,1006	34,17	34,0.01	34,0.13
	35,0.087	35,1151	35,19	35,0.01	35,0.01
	36,0.084	36,1154	36,21	36,0.01	36,0.01
	37,0.084	37,1077	37,22	37,0.02	37,0.02
	38,0.084	38,914	38,23	38,0.04	38,0.13

Figura 9. Tablas de parámetros y datos

parametros	datos
<pre> #áreas Pa1 =0.42 #area1 Pa2=0.105 #area2 Pa3=Pa4=0.21 #area34 Pa5=0.67 #areacub Pa6=0.63 #areaband Pes=0.02 #espesor laterales Pesc=0.004 #esp cubier Pess=10 #espsuelo #Volumenes y masas Pv1=Pa1*Pes Pv2=Pa2*Pes Pv3=Pv4=Pa3*Pes Pv5=Pa5*Pesc #cubierta PM1=Pv1*Pdens PM2=Pv2*Pdens PM3=PM4=PV3*Pdens PM5=0.536 #masacubierta Pdens=640 PMp=TablaMpp(tiempo) #0.5 Pcpm= 1170 #cpmadera Pcpp= 3350 #cppolic Pcp=4184 #Resistencias convectivas Phca1=5.8+2.8*Pwa1 Phca2=5.8 Phca3=5.8+2.8*Pwa3 Phca4=5.8 Phc1=5.8+2.8*Pw1 Phc2=5.8+2.8*Pw2 Phc3=5.8+2.8*Pw3 Phc4=5.8+2.8*Pw4 Phcp1=5.8+2.8*Pwp1 Phcp2=5.8+2.8*Pwp2 Phcp3=5.8+2.8*Pwp3 Phcp4=5.8+2.8*Pwp4 Pc1=5.8+2.8*Pwpi1 Pc2=5.8+2.8*Pwpi2 Phcis=5.8+2.8*Pwis Phcii=5.8+2.8*Pwii Phca=5.8+2.8*Pwa Phcc1=5.8+2.8*Pw1 Phcc2=5.8+2.8*Pw2 Pc3=5.8+2.8*Pw3 Pc4=5.8+2.8*Pw4 Pw1=Pw2=Pw3=Pw4=Pwp1=Pwp2=Pwp3=Pwp4=Pwpi1=Pwpi2=Pwis=Pwii=TablaVi(tiempo) #0.45 Pwa=0.37 Pwa1=TablaVo(tiempo) #0.29 Pwa3=TablaVi(tiempo) #0.45 #Conductividades Pkm=0.094 #cmadera Pkp=0.23 #cpolicar Pks=5 #csuelo #Emisividades Pepo= 0.90#Policarbonato Pep=0.5 #Productoinventado Pec=0.28 #Chapa Pem= 0.82#Madera #Fuente de Calor Pj=TablaRad(tiempo) #*Ptr #Temperaturas Ptaa=TablaTamb(tiempo) #Provisorio Ptas=18.2 #transmitancia policarbonato Ptr=0.7 #temperaturas iniciales Ptin=20 </pre>	<pre> #masas CMaa=CMab=C1, Pcpp, PM5/2 CM1a=CM1b=C1, Pcpm, PM1/2 CM2a=CM2b=C1, Pcpm, PM2/2 CM3a=CM3b=C1, Pcpm, PM3/2 CM4a=CM4b=C1, Pcpm, PM4/2 CMb=C1, Pcp, PMp #Resistencias convectivas Rhca=V1, Pa5, Phca Rhca1=V1, Pa1, Phca1 Rhca2=V1, Pa2, Phca2 Rhca3=V1, Pa3, Phca3 Rhca4=V1, Pa4, Phca4 Rhcc1=V1, Pa1, Phcc1 Rhcc2=V1, Pa2, Phcc2 Rhcis=V1, Pa5, Phcis Rhc1=V1, Pa1, Phc1 Rhc2=V1, Pa2, Phc2 RC1=V1, Pa6, Pc1 RC2= V1, Pa6, Pc2 Rhc3=V1, Pa3, Phc3 Rhc4=V1, Pa4, Phc4 Rhcp1=V1, Pa1, Phcp1 Rhcp2= V1, Pa2, Phcp2 Rhcp3= V1, Pa3, Phcp3 Rhcp4=V1, Pa4, Phcp4 Rhcii=V1, Pa6, Phcii RC3=V1, Pa3, Pc3 RC4=V1, Pa4, Pc4 #Resistencias radiativas Rhra=R1, Pa5, 0.9, 1 Rhris=R1, Pa6, 0.9, 1 Rr1=R1, Pa6, 0.5, 1 Rr2=R1, Pa6, 0.5, 1 Rhris=R1, Pa6, 0.28, 1 Rhr1=R1, Pa1, 0.82, 1 Rhr2=R1, Pa2, 0.82, 1 Rhr3=R1, Pa3, 0.82, 1 Rhr4=R1, Pa4, 0.82, 1 Rhra1=R1, Pa1, 0.82, 1 Rhra2=R1, Pa2, 0.82, 1 Rhra3=R1, Pa3, 0.82, 1 Rhra4=R1, Pa4, 0.82, 1 #Resistencias conductivas Rkc=D1, Pa5, Pesc, Pkp Rk1=D1, Pa1, Pes, Pkm Rk2=D1, Pa2, Pes, Pkm Rk3=D1, Pa3, Pes, Pkm Rk4=D1, Pa4, Pes, Pkm #Rks=D1, Pa6, Pess, Pks #Flujo de Calor J1= JQ, Pa5, PJ #Temperaturas Eaa=E1, Ptaa #Eas=E1, Ptas </pre>

Figura 10. Tablas para simulación construidas a partir de los datos obtenidos experimentalmente

Se observa en la figura 11 las curvas obtenidas de la evolución de la temperatura en la zona de la bandeja donde se encuentra el producto. Se graficaron la curva obtenida de los datos medidos mediante las Raspberry Pi y aquellos generados a partir de la simulación empleando SIMUSOL, así como la evolución de la temperatura ambiente durante el proceso de secado. Se puede observar un muy buen ajuste entre los datos medidos y los obtenidos con SIMUSOL esto corroborado a su vez a partir del cálculo de RMSE el cual dio un 8% y el del MBE del -4%, resultados que evidencian un muy buen ajuste por parte de la simulación.

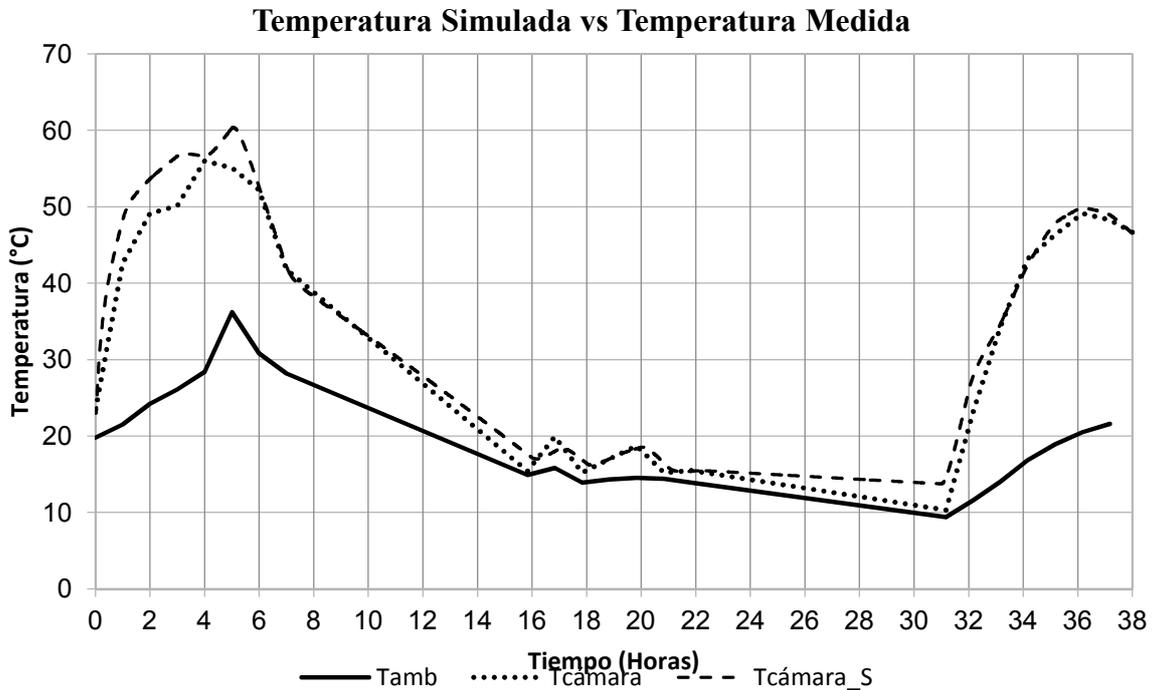


Figura 11. Curvas de la evolución de la temperatura en la zona de la bandeja del deshidratador obtenidas a partir de los datos medidos (Tcámara) y los simulados (Tcámara_S). Evolución de la temperatura ambiente (Tamb)

Finalmente se puede observar en la figura 12 el coeficiente de determinación calculado para la temperatura de la cámara simulada vs la temperatura de cámara medida siendo $R^2=0,9828$, respaldando nuevamente los buenos resultados obtenidos de la simulación.

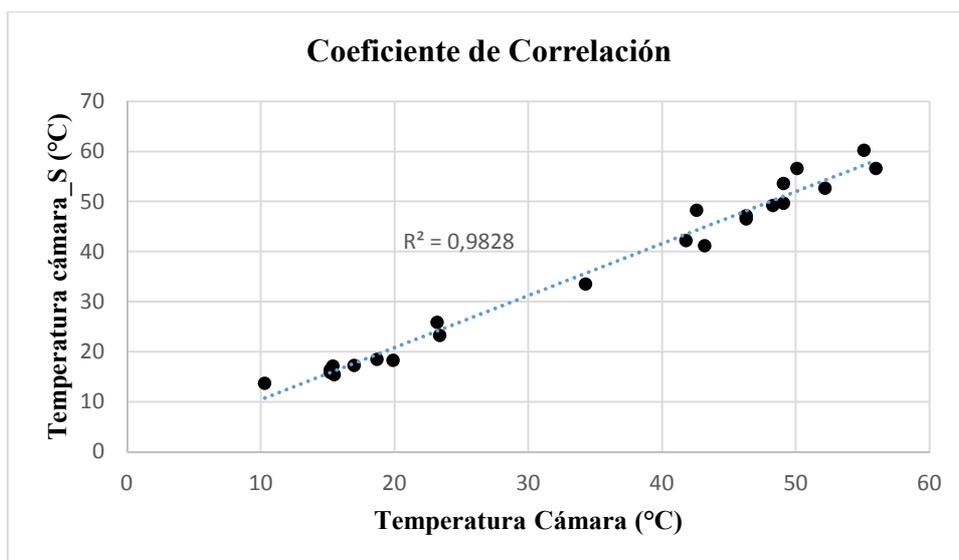


Figura 12. Coeficiente de correlación entre la evolución de la temperatura de la cámara medida y la simulada

CONCLUSIONES

Los primeros resultados evidencian que en general el modelo de simulación propuesto funciona adecuadamente y permite continuar trabajando sobre el mismo para incorporar aquellos ajustes pendientes.

El empleo de SIMUSOL resulta una muy buena herramienta para la simulación de circuitos térmicos, el cual permite prever con gran precisión como repercutirán sobre la eficiencia distintas modificaciones que se realicen sobre equipos en cuestión además del ahorro de recursos que su uso implica.

La toma de medidas utilizando microcomputador como las Raspberry Pi permite la automatización de la toma de datos y la generación de un registro de parámetros mucho más completo lo que mejora considerablemente el análisis y el seguimiento de los equipos durante su funcionamiento.

Queda pendiente el profundizar y seguir ajustando el modelo aquí propuesto, sería interesante en una próxima instancia el realizar la simulación en las tres dimensiones.

REFERENCIAS

- Espinoza R. y L. Saravia. (2010). Secado Solar de Productos Agroalimentarios en Iberoamérica. Red Iberoamericana de Secado Solar de Productos Agroalimentarios (RISSPA). CYTED.
- Hoyos D, Moya T., Villena M. y Serrano V. H (2014). Sistema de monitoreo y control remoto para un generador de electricidad con un concentrador Fresnel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 18, pp.08.69-08.78.
- Raichijk C. (2009). Comparación de valores satelitales de irradiación solar global con datos de tierra en la República Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 13, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Salvo A. W, Franco J. y Pais. A (2017). Incorporación de valor agregado a la producción frutícola de la región subtropical de la provincia de Salta y Jujuy con utilización de energías renovables. *ASADES 2017 - XL REUNIÓN DE TRABAJO - SAN JUAN*.
- Yahia E. M. y Flores R. A. (2001). Tratamientos físicos en poscosecha de fruta y hortaliza.

ABSTRACT:

This article presents experimental and simulation results of a direct passive solar dryer. A direct-box dehydrator was built and tested under real operating conditions for the drying of bananas. The measurement of the experimental parameters was automated using a Raspberry Pi device built and programmed for this purpose. It was simulated in SIMUSOL and the model was developed in free software DIA. A very good fit between the measured data and that achieved with SIMUSOL was obtained. The first results show that in general the proposed simulation model works properly and allows us to continue working on it to incorporate those pending adjustments.

Keywords: Solar drying of bananas, passive dehydrator, simulation, passive solar dryer, SIMUSOL.

MODELIZACIÓN NO UNIFORME DE LA DISTRIBUCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN UN ABSORBEDOR LINEAL TIPO FRESNEL

Marcos Hongn¹, Silvana Flores Larsen², Pablo Dellicompagni³, Diego Chocobar*

INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina

Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255489

*INTI-centro Salta. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Av. Durañona 822. Salta CP 4400.

E-mail: marcoshongn@gmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: El estudio del comportamiento hidrotérmico del fluido de trabajo es un tema clave en la generación directa de vapor a través de concentradores solares. El objetivo de este trabajo fue modelar diferentes condiciones de operación y geometrías de concentradores solares lineales para aumentar el rango de validez del modelo. Se obtuvo un buen ajuste entre los datos experimentales disponibles y las simulaciones realizadas. Mediante un análisis paramétrico se determinó el error relativo asociado a la modelación bajo consideraciones de distribución uniforme y no uniforme de la radiación solar a lo largo del absorbedor, para diferentes latitudes y condiciones de flujo másico. Se recomienda la implementación de estrategias para mitigar el efecto de pérdida óptica por los extremos del absorbedor en prototipos pequeños, siendo críticos los meses de invierno donde, para el mediodía solar, la eficiencia térmica cae un 25 % con respecto a un día de verano.

Palabras clave: concentrador Fresnel lineal, prototipos pequeños, generación directa de vapor, pérdidas ópticas.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de concentración solar se han convertido en tecnologías viables y rentables, con un potencial prometedor. Éstos se caracterizan por contar con un absorbedor lineal en el que circula el fluido de trabajo (agua o aceite sintético), el mismo es calentado hasta altas temperaturas mediante la radiación solar concentrada. Si el fluido de trabajo es agua, se puede generar vapor directamente en el absorbedor sin la necesidad de utilizar intercambiadores de calor. Dependiendo del campo del reflector y la geometría del absorbedor, generalmente pueden encontrarse dos tipos de sistemas: cilindro-parabólico (PTC) y Fresnel lineal (LFC). Ambos han sido ampliamente estudiados y caracterizados, y en la bibliografía son mayoría los estudios asociados a sistemas de mediana y gran escala para la generación de electricidad (Hachicha et al., 2018; Serrano-Aguilera et al., 2017; Tsekouras et al., 2018). Por el contrario, los estudios sobre sistemas de concentración a pequeña escala, rango de temperaturas del fluido entre 150-300 °C, son escasos.

La gran variedad de aplicaciones posibles para sistemas LFC de pequeña escala resulta prometedora, pero se necesita más investigación para caracterizar su comportamiento termodinámico y energético, debido a su funcionamiento bajo condiciones particulares. En comparación a los grandes sistemas LFC, los de pequeña escala deben enfrentar dos problemas principales que afectan su rendimiento energético: la falta de uniformidad en la distribución de radiación solar que llega al absorbedor y los bajos flujos de masa del fluido de trabajo. La principal fuente de no uniformidad del flujo solar a lo largo de la longitud del absorbedor -no muy significativa en los sistemas grandes, pero crucial en los pequeños- es la pérdida óptica por los extremos, que puede representar hasta el 33 % de la pérdida óptica total (Yang et al., 2018; Barbón et al., 2016). Este efecto es causado por zonas "sombreadas" en los extremos del absorbedor producidas por la posición aparente del sol en el cielo para una latitud, día y hora dados. En estas zonas y dependiendo de las condiciones del fluido, pueden tener lugar

¹ Becario Posdoctoral CONICET

² Investigador Adjunto CONICET

³ Becario Doctoral CONICET

mecanismos de condensación, situación poco probable en los grandes sistemas. Además, los sistemas pequeños generalmente se construyen con componentes de menor costo, incluidos los del campo reflector, lo que disminuye el rendimiento óptico del sistema en términos de reflectividad y precisión en la concentración de los rayos solares (Heimsath et al., 2010).

La integración del comportamiento óptico con la termodinámica del fluido de trabajo es un aspecto importante a considerar en las simulaciones de LFC, para ello se utilizan dos tipos de modelos hidro-térmicos dependiendo de la uniformidad de la distribución del flujo solar. Para un flujo uniforme, se suelen emplear modelos homogéneos y heterogéneos 1-D. Para la consideración de flujo solar no uniforme, se utilizan modelos de traza de rayos acoplados a modelos de dos fases homogéneos simples o a modelos que trabajan con CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), aunque se consiguen resultados con mayor precisión, el costo computacional es alto. En la bibliografía se encuentran varios trabajos donde se aplican diferentes modelos hidro-térmicos a configuraciones LFC diferentes. Por ejemplo, en India, Sahoo et al. (2013) desarrollaron un modelo homogéneo genérico en estado estacionario para un LFC con un absorbedor monotubular enrollado en la cavidad absorbidora en forma de espiral, como se detallará en la sección siguiente. El modelo fue contrastado experimentalmente con un prototipo LFC con un flujo másico de 0,15 kg/s. Más recientemente, los mismos autores desarrollaron un modelo heterogéneo mediante el uso del software RELAP5, que se utiliza comúnmente para el modelado de flujo en dos fases en reactores nucleares (Sahoo et al., 2016). Los métodos detallados de traza de rayos tridimensionales también son populares en las simulaciones de LFC. El método de trazado de rayos de Monte Carlo (MCRT) fue utilizado por Moguimi et al. (2015) para evaluar el rendimiento térmico-óptico de un prototipo LFC a través del método de volúmenes finitos (VF) implementado en el software ANSYS Fluent para analizar un flujo de una fase en el absorbedor (sin cambio de fase). Qiu et al. (2016) simularon las condiciones de flujo de vapor sobrecalentado en un LFC con cavidad absorbidora trapezoidal y distribución de radiación solar reflejada no uniforme, a través de MCRT y VF. Los autores concluyeron que los perfiles de temperatura varían fuertemente según la distribución de la radiación solar sobre el absorbedor, y que la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior del tubo - que puede alcanzar 50 °C - incrementa el coeficiente de transferencia de calor global en condiciones de bajo flujo de masa. Mientras que en Hongn et al., (2015a) se ha presentado un modelo hidro-térmico estacionario para un dominio unidimensional donde el fluido de trabajo fue modelado mediante las consideraciones de flujo bifásico homogéneo. Para contrastar los resultados simulados, se obtuvieron datos experimentales de un LFC de 173 m² ubicado en San Carlos (Salta) para condiciones de funcionamiento en días de verano e invierno, ambas con flujo másico bajo.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es contrastar los resultados obtenidos por el modelo hidro-térmico con datos experimentales encontrados en la bibliografía. Por otro lado, se proponen estudios paramétricos para determinar la influencia de las pérdidas ópticas en el desempeño térmico de sistemas LFC de pequeña escala y para analizar cuán influyente es la consideración de distribución no uniforme de radiación solar sobre el absorbedor, aspecto que la mayoría de los modelos no abordan en detalle (cuando no trabajan con traza de rayos). Es decir, estos modelos consideran la pérdida óptica mencionada, pero como un factor que afecta a todo el absorbedor por igual sin considerar que a lo largo del absorbedor las condiciones de "iluminación" son variables. Para los análisis paramétricos se consideraron las características constructivas del prototipo LFC instalado en San Carlos, descrito en Hongn et al. (2015a).

MODELO PROPUESTO Y CONSIDERACIONES

La distribución de la radiación solar a lo largo del eje del absorbedor se modela como un perfil escalonado. Por lo tanto, la zona completamente iluminada del absorbedor recibe la contribución energética de todos los espejos en el campo, mientras que la zona no iluminada no recibe aportes energéticos del campo reflector. En la fig. 1 se esquematiza un tubo absorbedor que recibe radiación solar reflejada por el campo de espejos en un LFC. La región no iluminada varía dependiendo del día del año y, para un día determinado, dependiendo de la hora, y puede predecirse a través de ecuaciones geométricas conocidas (Duffie y Beckman, 2006). La zona de transición entre regiones totalmente iluminadas y "sombreadas" se modela como un conjunto de escalones parcialmente iluminados con niveles intermedios de radiación solar reflejada. Tanto la cantidad de "escalones", como su altura y

ancho dependen de la contribución de cada grupo de espejos (en fig. 1 sólo se esquematiza una región de absorbedor “semi-iluminado”). Esta distribución no uniforme de la radiación solar hace que el fluido dentro de la tubería alcance diferentes estados termodinámicos. Por lo tanto, en la entrada del tubo, el agua entra en estado líquido (región I). Luego, el agua se calienta a medida que fluye dentro del absorbedor (región II) y donde comienza el proceso de ebullición, el fluido coexiste como líquido y vapor (región III). Para condiciones de elevados niveles de radiación solar concentrada, el agua puede ser completamente vaporizada (región IV) por lo que el fluido es de una sola fase nuevamente, vapor sobrecalentado. En ciertas circunstancias, que dependen de las características geométricas del LFC y de condiciones geo-ambientales, es posible que el extremo del absorbedor no reciba radiación y tenga lugar un proceso de condensación (región V). En este caso, en la salida del tubo, está presente una mezcla vapor-líquido (dos fases) o vapor sobrecalentado (una fase). Las mencionadas regiones se muestran en la fig. 1 (abajo).

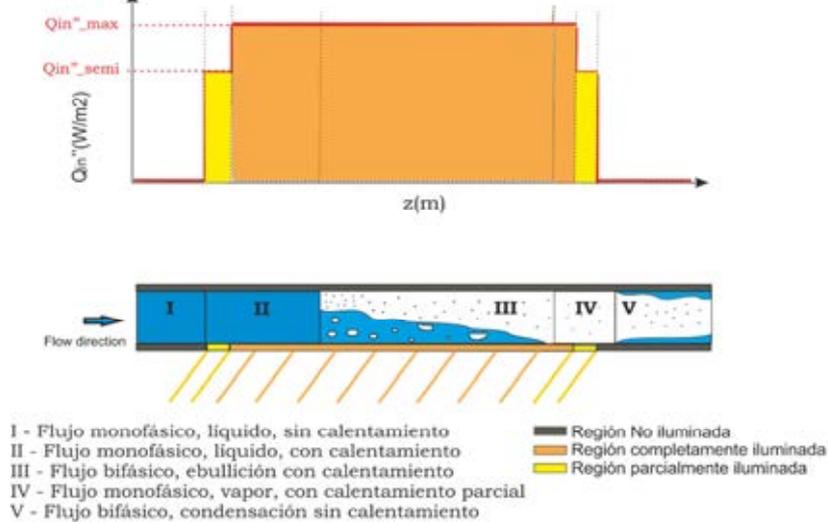


Fig. 1. (Arriba) Representación esquemática de una distribución axial escalonada de radiación solar sobre la superficie inferior del absorbedor. (Abajo) Representación esquemática de los diferentes estados del fluido dentro del tubo absorbedor dependiendo del nivel de iluminación (acorde a la figura superior).

El modelo propuesto se basa en los balances de masa, energía y momento para el fluido de trabajo, junto con ecuaciones que describen la caída de presión y la transferencia de calor entre el fluido y la pared del tubo. Algunas suposiciones adoptadas fueron:

- estado estacionario
- modelación de flujo homogéneo en las regiones de flujo bifásico
- en las regiones iluminadas, la radiación solar es uniformemente distribuida sobre el perímetro de los tubos
- flujo de masa uniforme dentro de los tubos del absorbedor
- transferencia de calor axial despreciable frente a la radial
- acumulación de calor despreciable en la pared de los tubos
- propiedades térmicas del absorbedor constantes

Como se indica en fig. 2a, la longitud del tubo es dividida en elementos con ancho dz , a lo largo del eje z . Para cada elemento del dominio, el fluido entra a temperatura T , presión P , entalpía h , velocidad u y fracción de vapor x (también conocida como “calidad”). La transferencia de calor se considera unidimensional en dirección radial y ocurre entre la superficie externa del tubo y el fluido, fig. 2b, donde Q''_{abs} es la tasa de calor absorbida por el fluido por unidad de área de absorbedor. Las premisas básicas del modelo uniforme por el cual se analiza el flujo de dos fases son: velocidades iguales del vapor y el líquido, equilibrio termodinámico entre fases y la implementación de un factor de fricción adecuado para el flujo bifásico. Así, el flujo de dos fases (mezcla agua líquida-vapor) es considerada como un flujo simple con propiedades de ambas fases promediadas y pesadas (Collier y Thome,

1996). Las ecuaciones de balance para un flujo homogéneo y en estado estacionario pueden ser escritas de forma general de la siguiente manera:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{d}{dz}(\bar{\rho}A\bar{u}) = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momento:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{1}{A} \frac{d(\bar{\rho}A\bar{u}^2)}{dz} + \tau_w \frac{P}{A} + \bar{\rho}g \sin\varphi \quad (2)$$

Ecuación de energía:

$$\dot{m} \frac{d\bar{e}}{dz} = Q''_{abs} P \quad (3)$$

Donde A es el área transversal del tubo (m^2), P es el perímetro del tubo (m), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2) y φ es la inclinación del tubo (grados). El esfuerzo de corte (*shear stress*) y la tasa de calor absorbida por unidad de área de absorbedor son representados por τ_w y Q''_{abs} respectivamente.

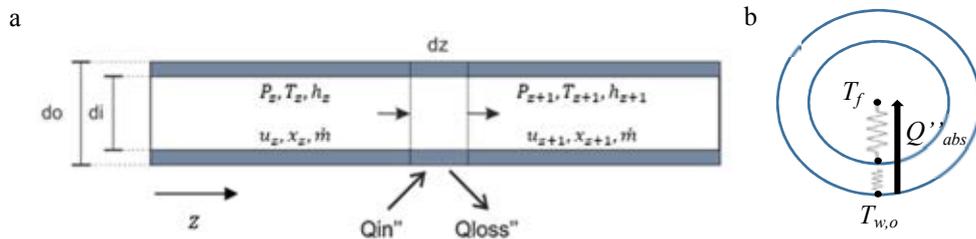


Fig. 2. a) Discretización de un tubo absorbedor a lo largo del eje z . b) Circuito térmico para la transferencia de calor entre la pared externa del tubo y el fluido.

Modelado de la distribución del flujo solar

Se considera un LFC de geometría rectangular (misma longitud de absorbedor y reflectores) cuyo campo de espejos se compone de N_m filas de igual ancho W_m , longitud L_m y reflectancia solar ρ_m (variable con el ángulo de incidencia). Cada fila de espejos se encuentra a una distancia horizontal D_i desde la proyección del eje del absorbedor en el plano del espejo (positivo cuando el espejo está al oeste del receptor). El absorbedor se encuentra a una altura H desde el plano de apertura de los reflectores y consiste en N_t tubos de diámetro interno y externo d_i y d_o respectivamente, absorptancia solar α y una cubierta transparente cuya transmitancia solar es τ . Para una latitud determinada, día y horario, cada espejo del campo tiene una inclinación β_i y un azimut γ_i . Si la irradiancia solar directa normal es denotada con DNI , entonces la radiación solar concentrada sobre la superficie de los tubos del absorbedor Q''_{in} (W/m^2 de tubo absorbedor) en la región completamente iluminada se calcula como:

$$Q''_{in} = \frac{DNI \tau W_m F_c}{N_t \pi d_o} \sum_{i=1}^{N_m} F_{w,i} \cos\theta_i \rho_m(\theta_i) \quad (4)$$

Donde θ_i es el ángulo de incidencia entre los haces solares y cada fila de espejo, F_c es el factor de limpieza de los reflectores y es un valor entre 0 y 1 asociado a la deposición de suciedad y polvo en los mismos (usualmente entre 0,7 y 0,9). El factor F_w es un parámetro óptico definido en Hongn (2017) que considera el sombreado sobre los espejos causado por la presencia de la cavidad absorbidora.

Para considerar las regiones con iluminación parcial y nula, lo que afecta la sumatoria en el cálculo de Q''_{in} , debe determinarse la longitud no iluminada del absorbedor provocada por el espejo i -ésimo (Hongn et al., 2015b):

$$L_{D,i} = \frac{(\sin\theta_z \cos\gamma_s \cos\beta_i)D_i + (\sin\theta_z \cos\gamma_s \sin\beta_i \sin\gamma_i)H}{\sin\theta_z \sin\gamma_s \cos\beta_i - \sin\beta_i \cos\theta_z \sin\gamma_i} \quad (5)$$

Este efecto es representado en la fig. 3, cada espejo contribuye a iluminar una región del absorbedor (de igual longitud al espejo, aunque desplazada sobre el eje axial de la cavidad) causando un perfil de radiación solar tipo escalón sobre los tubos.

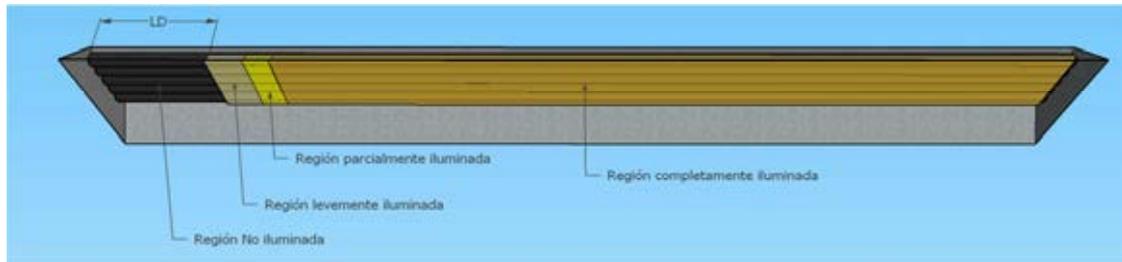


Fig. 3: Perfil de radiación solar tipo escalón sobre el absorbedor causado por los espejos a diferentes distancias focales del mismo, se esquematizan dos niveles en la región semi-iluminada.

Pérdidas térmicas de la cavidad absorbidora para diferentes condiciones de viento

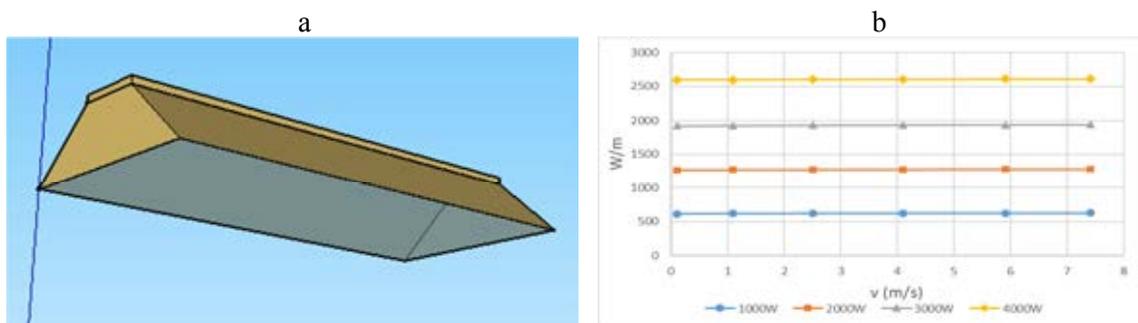
Para estimar las pérdidas de calor desde la cavidad absorbidora hacia el ambiente, ésta fue simulada mediante el software Energy Plus. Si bien esta potente herramienta no fue desarrollada para esta clase de situaciones, las condiciones constructivas de la cavidad fueron adaptadas para que el software reconozca correctamente los elementos (fig. 4a). Se tomó como base lo propuesto por Flores Larsen et al. (2013), quienes modelaron la misma cavidad considerando que la cubierta transparente era una lámina plástica de Mylar y para viento nulo. En esta nueva simulación se considera que la cubierta transparente es vidrio templado de 4 mm y que la cavidad se encuentra sometida a una corriente constante de aire (en dirección perpendicular al eje axial de la cavidad) para velocidades de viento variables entre 0,1 y 7,5 m/s, además de la disipación variable de calor (entre 1000 W y 4000 W) en el interior de la cavidad (representa la disipación de calor de los tubos a temperaturas elevadas). Los detalles constructivos de la cavidad se pueden obtener de Flores Larsen et al. (2013).

Las pérdidas por el vidrio representan entre el 86 % y el 92 % de las pérdidas totales por la cavidad. La fig. 4b muestra las pérdidas térmicas totales por unidad de longitud del vidrio en W/m para diferentes velocidades de viento, presentando un comportamiento prácticamente constante con la variación de este parámetro. Si hay cambios en los mecanismos de pérdida térmica, donde las pérdidas convectivas (fig. 5a) aumentan con la velocidad de viento a mayor tasa acorde mayor sea la temperatura de los caños (la variación en T_w responde a la potencia disipada). En cuanto a las pérdidas radiativas (fig. 5b), se observa un comportamiento inverso de las pérdidas acorde a la velocidad del viento debido a que las caras externas de la cavidad disminuyen su temperatura acorde aumente el flujo de aire externo.

Analizando las pérdidas térmicas por todos los elementos de la cavidad, se encuentra que el coeficiente global de pérdida de calor $U_L (Wm^{-2}K^{-1})$ puede ser ajustado mediante una ecuación exponencial como lo indica la ec. (6). El efecto de la velocidad de viento en m/s está incluido en el parámetro A definido en ec. (7).

$$U_L (Wm^{-2}K^{-1}) = A(v) \exp(0,0033 \Delta T) \quad (6)$$

$$A = 2,8745 v^{0,0211} \quad (7)$$



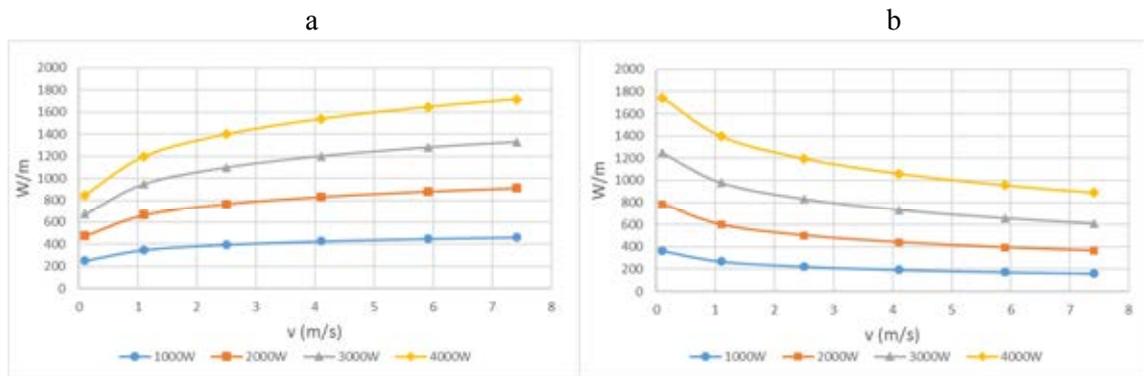


Fig. 4: Para la cubierta de vidrio de la cavidad, a) esquema de la cavidad para la simulación en Energy Plus y b) tasa de calor perdido (total).

Fig. 5: Para la cubierta de vidrio transparente, tasas de calor perdido hacia el ambiente por unidad de longitud de vidrio: a) por convección y b) por radiación, ambas en función de la velocidad del aire fuera de la cavidad.

Datos experimentales

Los datos experimentales asociados al comportamiento hidrotérmico del fluido de trabajo en sistemas LFC son muy limitados en la bibliografía. Fueron consideradas las condiciones de operación y geometría de un prototipo LFC instalado en Coimbatore (11,02° N; 76,97° E, India) y estudiado por Sahoo et al. (2013). Los autores presentaron datos medidos de temperatura el fluido a lo largo del absorbedor, para las entrada y salida y otros siete puntos intermedios (sensores dispuestos cada 50 m). Las temperaturas en la superficie del tubo fueron medidas en ocho puntos, mientras que para la entrada y la salida también se disponen de medidas de presión y fracción de vapor (salida). La posición de las termocupas en el absorbedor para obtener las temperaturas del fluido y del tubo se muestran en la fig. 4b.

Debido a los escasos datos de presión para las medidas presentadas por Sahoo, se consideró apropiado modelar las condiciones de un prototipo PTC del proyecto DISS (Zarza et al., 2004) en la Plataforma Solar de Almería (España) (37,08° N; 2,35° O) para evaluar el desempeño del modelo para la estimación de las caídas de presión a lo largo de un absorbedor lineal. Rheinländer y Eck (2002) presentaron resultados experimentales obtenidos de 12 pruebas en condiciones de estado estacionario. La longitud total del circuito hidráulico es 608 m donde 480 m corresponden al colector PTC (dividido en 11 módulos). Las conexiones entre los colectores representan los 128 m restantes. La apertura del colector es de 5,76 m, con una longitud variable, 48 m para los módulos 1-8 y 11, y 24 m para los módulos 9 y 10.

RESULTADOS

La fig. 6a muestra los resultados experimentales y simulados para el LFC de Coimbatore, para las condiciones operacionales de la tabla 1. Dos zonas están claramente definidas: la zona de calentamiento sensible (0 m-230 m) con un aumento cuasi-lineal de la temperatura del fluido; y la zona de cambio de fase (230 m-384 m) donde el proceso de ebullición hace que la temperatura permanezca constante a aproximadamente 525 °C. Se observa una buena concordancia entre las temperaturas simuladas y experimentales del fluido. La caída de presión del fluido dentro del tubo responde linealmente en la primera zona, observándose un incremento repentino en la zona de ebullición. La calidad del vapor es 0 en la zona de calentamiento sensible (fase líquida) y aumenta linealmente en la zona de cambio de fase. Como se muestra en fig. 6a, tanto la caída de presión (aproximadamente 1,13 bar) como la fracción de vapor (aproximadamente 0,35) ajustan muy bien con los valores medidos (salida del tubo). La configuración del absorbedor (monotubular) y el flujo másico del fluido dan lugar a una condición turbulenta de flujo ($Re_D=10300$ a la entrada del absorbedor).

Para la latitud de Coimbatore, y para el día y hora de las mediciones disponibles, la longitud no iluminada L_D (ec. 5) fue de 1,5 m en dirección norte. Debido a la configuración espiral del absorbedor

y al efecto L_D , se consideró un único tubo de 384 m de longitud dividido en 8 secciones, sin iluminación sobre los 1,5 m finales de cada “vuelta”. Se asignaron diferentes valores de radiación solar a cada celda (0,1 m de longitud), dependiendo la condición de “iluminación” total, parcial o no iluminada. La influencia de L_D se puede apreciar en los valores del coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c) y en el flujo de calor neto absorbido (Q''_{abs}), como se muestra en fig. 7.

	Item	Coimbatore	San Carlos
Campo Reflector	Área del campo (m ²)	690	215
	Nº filas de espejos	8	10
	Ancho de cada fila (m)	1,80	0,9
	Longitud de cada fila (m)	48	24
	Altura de los reflectores sobre el suelo (m)	1,00	1,00
Absorbedor	Geometría de la cavidad	Trapezoidal	Trapezoidal
	Elevación del absorbedor sobre el plano de los espejos (m)	12,00	6,96
	Nº tubos absorbedores	1 (espiral)	5 (paralelos)
	Diametros interno y externo del tubo (mm)	26,7 – 33,4	25-33
	Longitud del absorbedor (m)	384	Variable
	Profundidad de la cavidad (mm)	100	220
	Ancho inferior cavidad (mm)	500	685
	Ancho superior cavidad (mm)	300	220
	Tratamiento de la superficial del absorbedor	Selectivo-cromo negro	Pintura negra sin tratamiento selectivo
	Emitancia térmica	0,49	0,9
	Coefficiente global de pérdida térmica (W/m ² -K)	0,0001 $T_{w,o}^{1,739}$	Ecs. (6-7)
	Orientación del eje central	Norte-Sur	Norte-Sur
Condiciones de operación (durante medidas)	Día (DD/MM/YYYY)	01/04/2010	21/12 y 21/06
	Hora solar	12:00	12:00
	DNI (W/m ²)	667	800
	Temperatura ambiente (°C)	30	20
	Flujo másico (kg/s)	0,15	Variable
	Regimen de flujo	Turbulento	Variable
	Presión entrada (bar)	45	10
	Temperatura entrada (°C)	35	20

Tabla 1: Características constructivas y condiciones de operación para prototipo de Coimbatore (Sahoo 2013) y San Carlos (considerado en el apartado de Análisis Paramétricos).

La variación en los datos simulados de h_c y Q''_{abs} muestran, nuevamente, un comportamiento diferente en la zona líquida de una fase ($z < 230$ m) y en la zona de dos fases ($z > 230$ m). En la primera, h_c aumenta (de 1,9 kW/m²-K hasta aproximadamente 3,5 kW/m²-K) debido al incremento de la temperatura del líquido con z . Por otro lado, Q''_{abs} disminuye debido al incremento en las pérdidas térmicas (mayor diferencia de temperatura). En la zona de dos fases, h_c tiende a un valor aproximadamente de 7,0 kW/m²-K acorde a incrementa z , mientras que Q''_{abs} permanece constante durante el cambio de fase. La falta de uniformidad en la distribución del flujo solar se puede apreciar como una discontinuidad en ambos parámetros. En el caso de h_c , los valores por encima de la curva de tendencia están localizados en las regiones sin iluminar y se deben a la condensación que tiene lugar en todo el perímetro interno del tubo. Por otro lado, los valores más bajos de h_c (sobre la tendencia) se deben al mecanismo de ebullición que tiene lugar en las zonas de iluminación parcial (a menor flujo de calor Q''_{in}) y generalmente tiene lugar en parte de la superficie del tubo (según el patrón de flujo). Los resultados simulados concuerdan con los obtenidos por Sahoo et al. (2013). En el caso de Q''_{abs} , las discontinuidades observadas entre 3 y 4 kW/m² se atribuyen a las regiones parcialmente iluminadas. Los valores negativos de Q''_{abs} corresponden a las regiones no iluminadas donde el flujo de calor se invierte (fluido a mayor temperatura que superficie externa del tubo absorbedor). Bajo la consideración de distribución no uniforme de radiación solar sobre el absorbedor, la eficiencia térmica

del mismo se estima en 0,7. En contraste a esto, si se considera una distribución uniforme de la radiación, se estima una eficiencia de 0,82.

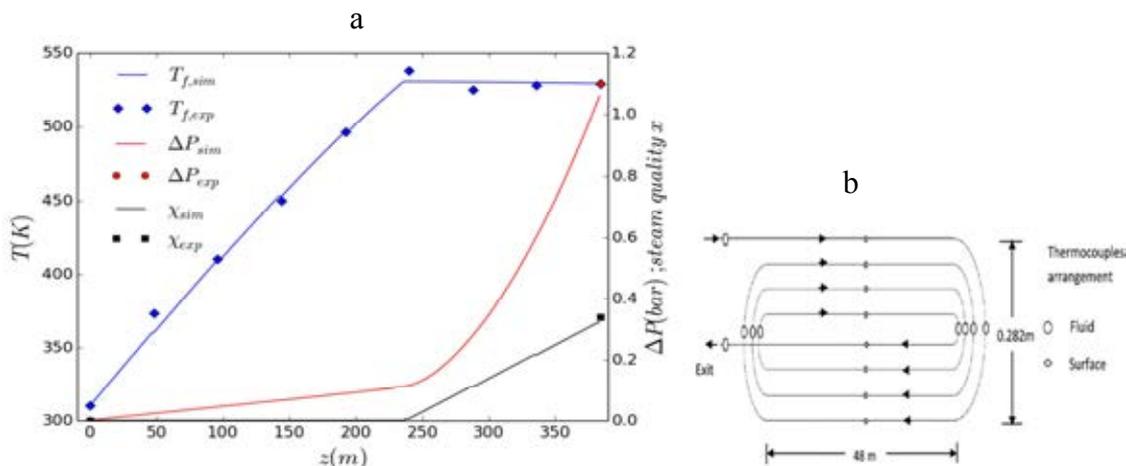


Fig. 6: a) Perfil de temperatura del fluido, caída de presión y calidad de vapor, datos experimentales (marcadores) y estimados (líneas sólidas), en función de la posición z a lo largo del tubo para el prototipo LFC de Coimbatore y bajo las condiciones de operación de la tabla 1. b) Configuración del tubo absorbedor, tipo espiral y ubicación de sensores (Sahoo et al., 2013).

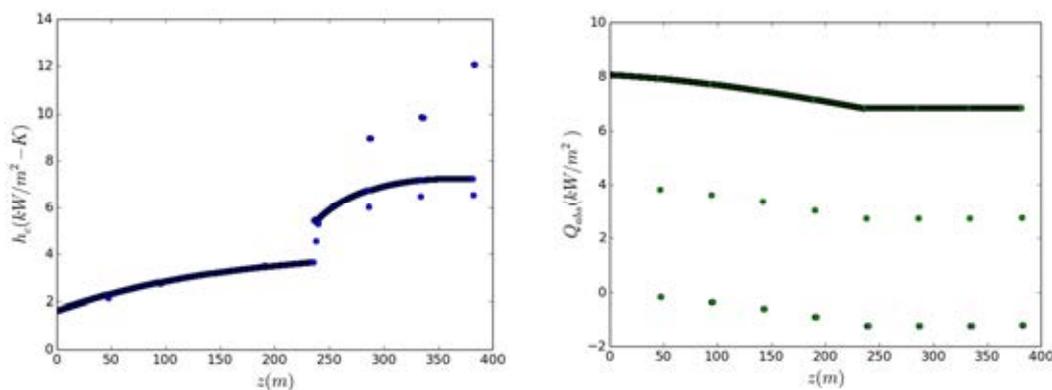


Fig.7: A lo largo del tubo absorbedor, valores simulados de: coeficiente de transferencia de calor convectivo (izq.) y tasa de calor absorbida por el fluido, por unidad de superficie de absorbedor (der.). Resultados para el prototipo LFC de Coimbatore, para las condiciones de operación de la tabla 1.

Desempeño del modelo frente a datos experimentales de Rheinländer y Eck

Para evaluar la respuesta hidrodinámica del modelo se utilizaron datos experimentales medidos por Rheinländer y Eck (2002). Estos datos incluyen: entalpía del fluido a la entrada y salida del colector, y datos de presión para cada módulo que compone el colector. La fig. 8 muestra la comparación entre los datos experimentales y los valores simulados, para las condiciones operacionales de la tabla 2. En el modelo, los valores de Q''_{abs} se ajustaron de manera tal de obtener el mismo cambio de entalpía total (tabla 2). Esto permite comparar el comportamiento de la presión del fluido para un calentamiento global equivalente. De la fig. 8 puede observarse que el ajuste entre la serie de datos experimentales y simulados es aceptable.

	Fig. 5a	Fig. 5b
p_{in} (bar)	34,52	63,56
\dot{m} (kg/s)	0,501	0,645
h_{in} (kJ/kg)	842,0	1026,0
h_{out} (kJ/kg)	3128,8	3089,5
$DNI * IAM$ (kW/m ²)	0,9040	0,8833
η_{coll}	0,677	0,826

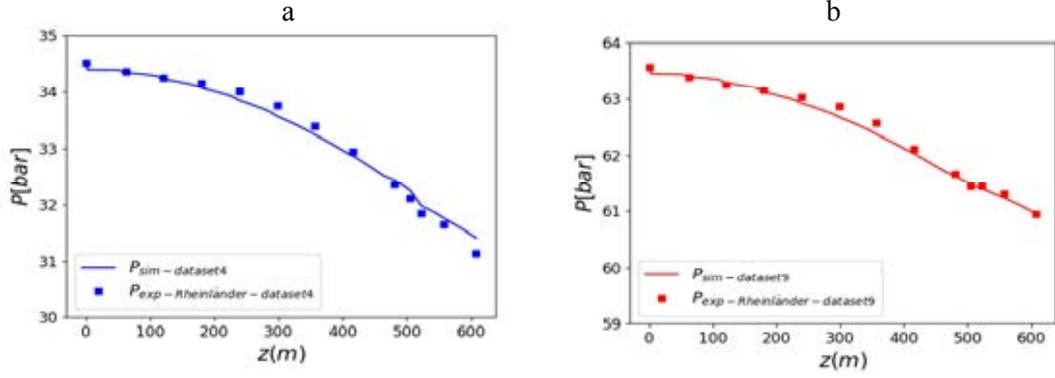


Tabla 2: Condiciones de operación de un absorbedor lineal de un sistema PTC (Proyecto DISS) registradas por Rheinländer y Eck (2002) para dos test experimentales.

Fig. 8: Caída de presión del fluido a lo largo de un absorbedor lineal, los datos experimentales (marcadores) fueron obtenidos por Rheinländer y Eck para dos test a diferentes condiciones de operación y los datos simulados se representan con líneas. Los datos de presión de entrada y flujo másico de fluido son: a) 34,52 bar y 0,501 kg/s, respectivamente; b) 63,56 bar y 0,645 kg/s, respectivamente.

Análisis Paramétrico

Se determinó paraméricamente la variación en el error relativo porcentual $E_r\%$ considerando la potencia térmica generada por un LFC cuyas características están listadas en la tabla 1 (columna derecha). A diferencia del prototipo descrito en Hongn et al. (2015), para este estudio se considera una geometría rectangular (misma longitud del campo reflector y del absorbedor) y 10 filas de espejos (en cuenta de las 8 que posee actualmente el prototipo). La potencia térmica estimada bajo la consideración de distribución uniforme de flujo solar se denota con P_{th_U} , mientras que los valores estimados bajo la consideración de no uniformidad se denotan con P_{th_N-U} . Así:

$$E_r\% = \frac{P_{th_N-U} - P_{th_U}}{P_{th_N-U}} \cdot 100 \quad (8)$$

La fig. 9 muestra la variación del E_r en función de la longitud del LFC para un día de verano y otro de invierno, considerando diferentes latitudes ϕ de emplazamiento (-15° , -25° y -35°) y parametrizado para diferentes flujos másicos de alimentación (\dot{m}). Acorde a la ec. (8), valores negativos en $E_r\%$ indican que los valores de P_{th_U} están sobreestimados con respecto a los predichos con el modelo propuesto. Las mínimas diferencias entre los resultados se observan para el día de verano ($<1\%$). Para un día de invierno, $E_r\%$ puede alcanzar valores de hasta 12% y, como era de esperarse, mayores diferencias para latitudes mayores. A $\phi = -25^\circ$, el máximo de E_r tiene lugar para longitudes de absorbedor $L_{abs} < 15$ m. La situación es similar a $\phi = -30^\circ$, aunque para $L_{abs} < 20$ m. Para este último caso, como la longitud no iluminada excede 10 m, el valor de E_r para $L_{abs} = 10$ m fue forzado a 0.

Se muestra, en la fig. 10, la variación paramétrica de la eficiencia térmica global η_{th} (eje principal) y de la fracción de vapor χ (eje secundario) en función de L_{abs} para las condiciones descritas en el análisis de E_r . Así, para el 21 de diciembre η_{th} y χ presentan comportamientos similares para las diferentes latitudes de análisis. El máximo valor de η_{th} se observa para $\phi = -25^\circ$ debido a que las pérdidas por los extremos del absorbedor son mínimas en este caso. Es notorio que la presencia de vapor sobrecalentado a la salida del absorbedor disminuye η_{th} para valores bajos de \dot{m} . Para $\phi = -25^\circ$, η_{th} disminuye rápidamente a partir de $L_{abs} \geq 30$ m cuando $\dot{m} = 0,025$ kg/s (en azul) y para $L_{abs} \geq 50$ m cuando $\dot{m} = 0,0416$ kg/s (en verde). Para valores de \dot{m} cercanos a 4,5 kg/min (líneas y puntos amarillos), η_{th} tiende a valores entre 0,40 y 0,45 para todos los casos. Para invierno (derecha fig. 10), debido a las pérdidas por los extremos del absorbedor la eficiencia cae a valores entre 0,30 y 0,35. Para \dot{m} entre 0,0416 kg/s and 0,0583 kg/s (2,5 kg/min y 3,5 kg/min, respectivamente) se requiere

longitudes de absorbedor superiores a 80 m para obtener a la salida vapor saturado con alta calidad ($\chi > 0,8$). De esta manera, para la generación de vapor con alta proporción de vapor seco (χ cercano a 1), un prototipo LFC de pequeña escala requiere la implementación de estrategias para contrarrestar las pérdidas ópticas por los extremos del absorbedor. La fig. 10 entrega información útil acerca de la longitud de absorbedor mínima, para la geometría especificada, que debe considerarse según los requerimientos del vapor a la salida (aplicaciones de hasta 250°C) para rangos de tasas de flujo másico entre 1,5 y 4,5 kg/min.

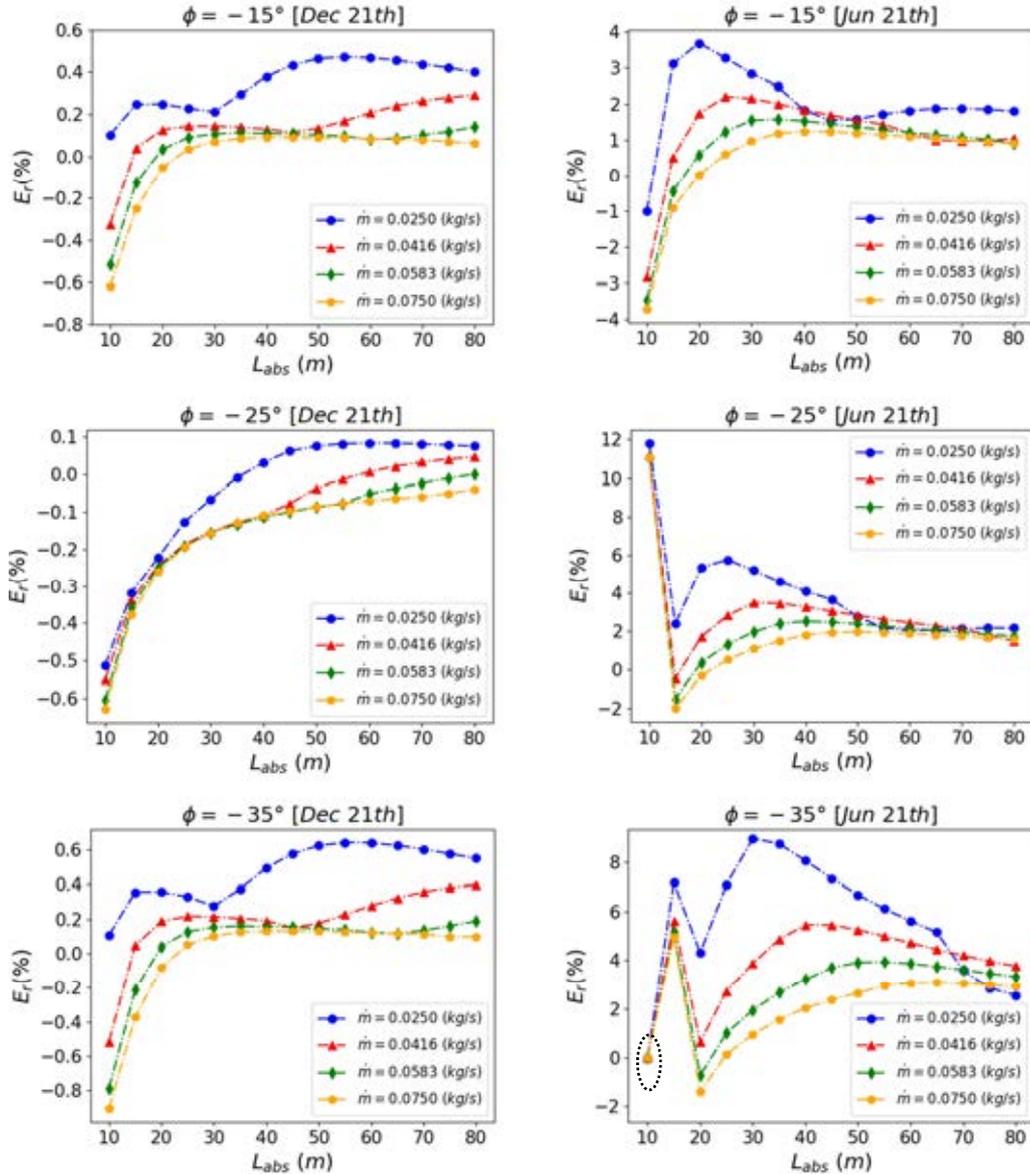


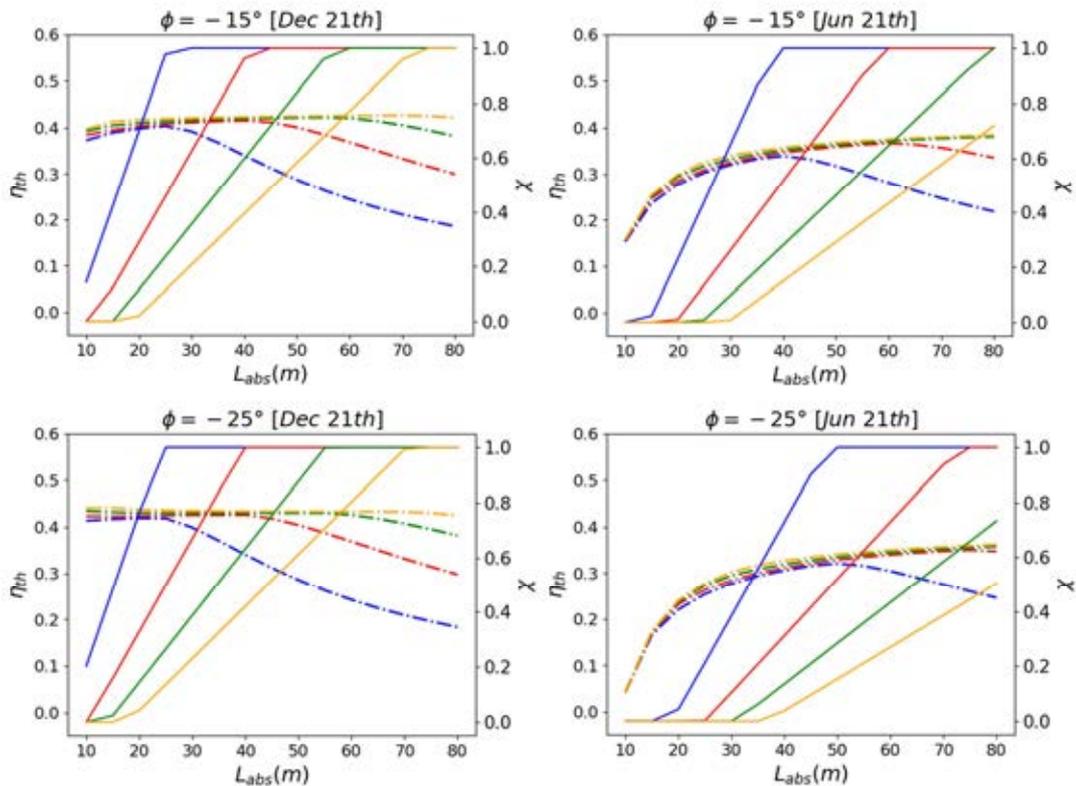
Fig. 9: Error relativo porcentual de la potencia térmica estimada bajo condiciones de distribución solar uniforme sobre toda la longitud del absorbedor (P_{th_U}) con respecto a la estimada para condiciones no uniformes empleando el presente modelo (P_{th_N-U}) para el 21 de Diciembre y el 21 de Junio al mediodía solar, a diferentes latitudes.

CONCLUSIONES

Se validó un modelo hidrotérmico para absorbedores lineales con generación directa de vapor, que fue desarrollado para simular las condiciones de operación de un prototipo LFC de pequeña escala que trabaja a bajos regímenes de flujo, contra datos experimentales de un prototipo instalado en Coimbatore (India). El modelo ajusta correctamente con las observaciones experimentales, donde el régimen de flujo es alto (debido a las características del absorbedor) siendo un prototipo de pequeña

escala. Además, se evaluó el comportamiento hidrodinámico del modelo mediante datos experimentales de caídas de presión a lo largo de un absorbedor lineal de un colector cilindro-parabólico (perteneciente al proyecto DISS), obteniendo un ajuste muy bueno entre simulaciones y datos medidos.

Mediante análisis paramétricos se comparan los resultados generados con este modelo teniendo en cuenta una distribución solar uniforme y no uniforme (mayor detalle). El error relativo al estimar la potencia térmica con base a la primera condición (con respecto a la segunda) es despreciable en los meses de verano sin importar la latitud y la longitud del LFC. Para invierno, el error puede alcanzar valores de 12 %, para sistemas de corta longitud y a latitudes medias, la diferencia entre resultados es mayor mientras menor sea la tasa de flujo másico de trabajo. Finalmente, se analizó la variación de dos parámetros importantes como la eficiencia térmica total y la fracción de vapor en función de la longitud de absorbedor. Para verano, los sistemas que operan con flujos de masa relativamente altos (superior a 2,5 kg/min) tienden a trabajar con eficiencias térmicas entre 0,40 y 0,45, estos valores disminuyen con la aparición de vapor sobrecalentado a la salida del absorbedor. En invierno, donde el efecto de pérdida óptica por los extremos del absorbedor es considerable, la eficiencia disminuye en todos los casos con respecto a la situación de verano. Para latitudes medias y altas, se requieren equipos muy largos (longitud mayor a 80 m) para obtener vapor saturado con calidad cercana a 1, para flujos másicos moderados (entre 2,5 kg/min y 3,5 kg/min). Así, los LFC de pequeña escala requieren la implementación de estrategias para mitigar el efecto de las pérdidas ópticas, principalmente para aquellas aplicaciones que necesitan la provisión de vapor a alta calidad (crítico en los meses de invierno).



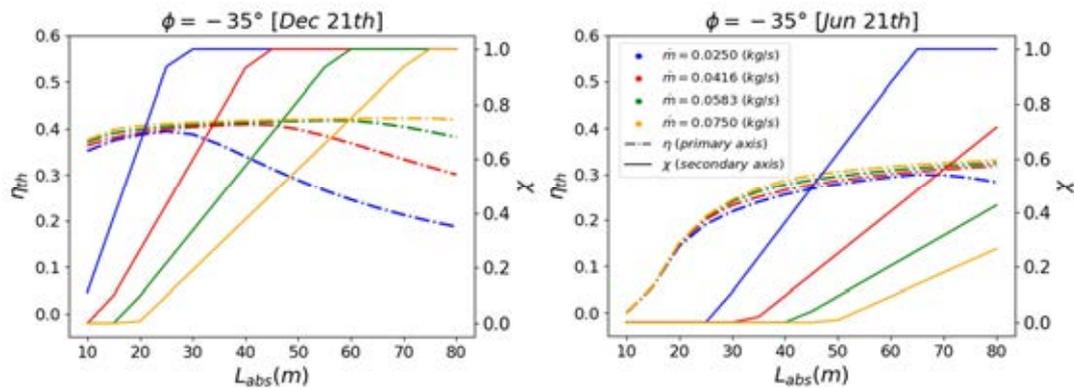


Fig. 10: Eficiencia térmica η_{th} (eje primario, puntos y líneas) y fracción de vapor χ (eje secundario, líneas sólidas) en función de la longitud del absorbedor, para los 21 de Diciembre y Junio al mediodía solar y para tres latitudes diferentes.

REFERENCIAS

- Barbón A., Barbón N., Bayón L., Otero J.A. (2016). Theoretical elements for the design of a small scale Linear Fresnel Reflector: frontal and lateral views. *Solar Energy*; 132:188–202.
- Collier J., Thome J. (1996). *Convective boiling and condensation*. 3rd ed. New York: Oxford Science.
- Duffie JA, Beckman WA. (2006). *Solar engineering of thermal processes*. 3rd ed. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Flores-Larsen S., Altamirano M., Hernández A. (2013). Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator. *Renewable Energy*; 39:198–206.
- Hachicha A., Rodríguez I., Ghenai C. (2018). Thermo-hydraulic analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector for direct steam generation. *Applied Energy*; 214:152–65.
- Heimsath A., Nitz P., Heß S. (2010). Concentrating solar collectors for process heat up to 250 °C and small scale CSP – Integrated optical design for improved performance. EuroSun2010.
- Hongn M. (2017). Estudio y evaluación de parámetros de funcionamiento para la tecnología Fresnel lineal de concentración. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta, Argentina.
- Hongn M., Flores Larsen S., Dellicompagni P., Hoyos D., Fernández C., Suligoy H., Bárcena H., Gea M. y Saravia L. (2015a). Simulación del comportamiento hidrotérmico del fluido de trabajo en un concentrador Fresnel lineal. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 36, pp. 01-10.
- Hongn M., Flores Larsen S., Gea M., Altamirano M. (2015b). Least square based method for the estimation of the optical end loss of linear Fresnel concentrators. *Solar Energy*, Volume 111, pp. 264 -276.
- Moghimi M., Craig K., Meyer J. (2015). A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of Linear Fresnel Collectors using the finite volume method. *Solar Energy*; 116:407–27.
- Qiu Y.L., He W. M., Zhang-Jing Z. (2016). A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver. *Renewable Energy*; 97:129–44.
- Rheinländer J. y Eck M. (2002). Direct Solar Steam (DISS) Research Project on Direct Solar Steam Generation (DSG) in Parabolic Trough Collectors Task 400 DG Applied Research Document DISS-SC-MI-03, Numerical Modelling of Pressure Losses.
- Sahoo S., Singh S., Banerjee R. (2013). Steady state hydrothermal analysis of the absorber tubes used in Linear Fresnel Reflector solar thermal system. *Solar Energy*; 87:84–95.
- Sahoo S., Singh S., Banerjee R. (2016). Thermal hydraulic simulation of absorber tubes in linear Fresnel reflector solar thermal system using RELAP. *Renewable Energy*; 86:507–16.
- Serrano-Aguilera J., Valenzuela L., Parras L. (2017). Thermal hydraulic RELAP5 model for a solar direct steam generation system based on parabolic trough collectors operating in once-through mode. *Energy*; 133:796–807.
- Tsekouras P, Tzivanidis C, Antonopoulos K. (2018). Optical and thermal investigation of a linear Fresnel collector with trapezoidal cavity receiver. *Applied Thermal Engineering*; 135:379–88.

Yang M., Zhu Y., Taylor R. (2018). End losses minimization of linear Fresnel reflectors with a simple, two-axis mechanical tracking system. *Energy Conversion and Management*; 161:284–93.

Zarza E., Valenzuela L., León J., Hennecke K., Eck M., Weyers H., Eickhoff M. (2004). Direct steam generation in parabolic troughs: final results and conclusions of the DISS project. *Energy*; 29(56):635–44.

ABSTRACT

The study of the hydrothermal behaviour of water-steam is a key topic in direct steam generation through solar concentrators. To simulate different operational conditions and geometries of solar linear concentrators was the aim of this work expanding the validation range of the proposed model. A good agreement was observed between the available experimental data and simulations. Through a parametric analysis, the relative error associated to uniform and no-uniform conditions for solar flux distribution on the length of the absorber was determined, for different latitudes and mass flow rate conditions. The implementation of strategies to mitigate the optical end losses in winter days are necessary in small scale prototypes, where the thermal efficiency falls at about 25% with respect to a summer day (at solar noon).

Keywords: Linear Fresnel Reflector, small-scale prototypes, direct steam generation, optical losses.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS SOLARES PARA CALENTAR AGUA USANDO UN PROGRAMA DINÁMICO

E. D. Albizzati

Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral
Santiago del Estero 2654 - CP 3000 - Santa Fe-Argentina
Tel.: 342 4571160 - email: albizzati@fiq.unl.edu.ar

Recibido 18/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: En este trabajo se simulan sistemas solares de mediana escala para calentamiento de agua con el software System Advisor Model. Las variables más importantes que se cargan en el programa son radiación solar, datos meteorológicos locales, perfil de demanda, temperatura del agua caliente e información técnica sobre los colectores solares y el tanque de almacenamiento. Los resultados indican que para una instalación de colectores planos selectivos con todas las baterías en paralelo, se calientan 9330 L de agua por m² de colector a 60 °C, lo que representa el 81,8 % de la demanda térmica anual. Además, se comprueba que la inclinación óptima de los colectores es mayor que la latitud de Santa Fe y un aumento en el volumen acumulado en el tanque disminuye la contribución de la energía solar. Finalmente, si se mantiene el caudal total de circulación, se verifica que al colocar cuatro baterías en serie, la contribución solar es 82,6 %, la energía solar térmica entregada crece y la energía auxiliar para calentamiento disminuye. En estas configuraciones la potencia para bombeo es mayor debido al aumento del caudal en cada colector y al arreglo de las baterías en serie.

Palabras clave: solar, calentamiento, agua, colectores, energía.

INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica es uno de los mayores recursos energéticos con que se cuenta, existiendo asimismo un amplio conjunto de tecnologías para su aprovechamiento en todos los niveles térmicos, siendo muy confiables las aplicables a bajas temperaturas (Albizzati, 2012; Duffie y Beckman, 2013; Kalogirou, 2014). Los procesos térmicos solares a menos de 100 °C que se han son: calentamiento de agua para lavado y limpieza, precalentamiento de agua para calderas, calentamiento de fluidos para operaciones en tanques y recipientes de procesos, calentamiento para secado y acondicionamiento de ambientes.

Debe tenerse en cuenta que el empleo de la energía solar térmica implica reducir la dependencia de los combustibles tradicionales, aumentar la competitividad al generar energía en forma independiente, tener previsibilidad en los costos ya que el sistema solar requiere mayoritariamente una inversión inicial, contribuir a paliar la secuela de daños originados en la emisión de gases de efecto invernadero y posibilitar eventualmente que la energía sustituida sea destinada a otras áreas prioritarias.

En particular en el año 2017 se contabilizó una capacidad de calentamiento solar de agua a baja temperatura en todo el mundo de 472 GW, especialmente para fines residenciales (REN21, 2018). Respecto al calentamiento solar a mayor escala, el campo es amplio abarcando sistemas públicos y privados, e instalaciones de servicios y de producción, habiéndose aplicado en las industrias alimenticia, de bebidas, metalúrgica, textil, entre otras, y en sistemas sanitarios de hospitales, complejos habitacionales, etc.

En el referido contexto muchas publicaciones han presentado estudios relacionados con el calentamiento solar de agua en diversas aplicaciones, realizando variados enfoques y empleando diferentes herramientas de análisis y cálculo (Albizzati, 2016; Frein et al., 2014; Mamouri y Bénard, 2018; Yan et al., 2015, Zainine et al., 2017).

Este trabajo simula el comportamiento de sistemas solares de mediana escala para calentar agua aplicando el programa dinámico System Advisor Model (SAM) versión 2017.9.5, elaborado por el National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos (DiOrio et al., 2014). Con el software se determinan la radiación solar horaria incidente sobre los colectores, la temperatura del agua suministrada, la energía solar aportada a la demanda térmica y el consumo energético para bombeo. Luego para un sistema con baterías de colectores solares en paralelo, se analiza el efecto de algunas variables relacionadas con dichos equipos y el tanque acumulador sobre cobertura solar de la demanda térmica. Finalmente se compara los comportamiento térmico de la instalación antes estudiada con otras similares en las cuales donde las baterías están configuradas en serie-paralelo.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SOLAR

En la instalación considerada en este trabajo el agua circula por convección forzada entre los colectores solares y el tanque acumulador (Figura 1). El circuito posee un intercambiador de calor y un controlador gobierna la captación de la radiación solar. El sistema solar se localiza en Santa Fe, Argentina y el consumo de agua caliente es de 2000 L diarios a 60 °C de temperatura, uniforme durante el día y a lo largo del año. Un suministro de energía auxiliar completa los requerimientos térmicos de la demanda prevista.

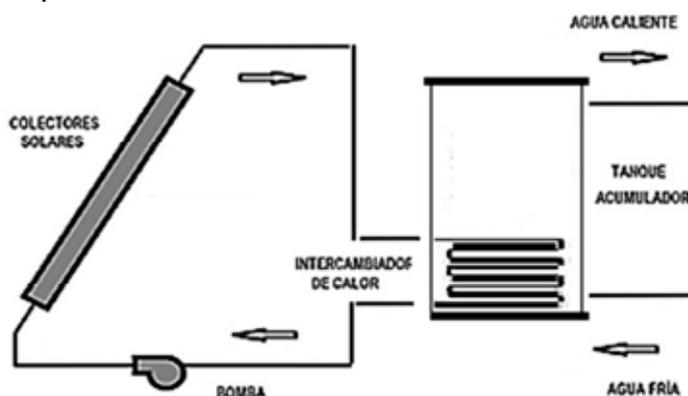


Figura 1. Esquema de la instalación solar para calentamiento de agua.

Como se detalla en la Tabla 1, el sistema solar se caracteriza, por el número de colectores (N_C), el área de colección (A_C), la inclinación de los colectores que miran al norte respecto al plano horizontal (B), el volumen de agua acumulado (T) y el coeficiente de pérdidas de calor del tanque (U_T). Además en la tabla se muestran los parámetros que caracterizan a los colectores ($F_R E_O$ y $F_R U_C$), que están asociados a E_O , la eficiencia óptica, F_R el factor de remoción del calor y U_C el coeficiente de pérdidas de calor, los que dependen de m_C , que es el caudal másico de agua por unidad de área de colección (ANSI/ASHRAE 93, 2010).

Colectores solares	N_C	A_C (m ²)	B (°)	$F_R E_O$	$F_R U_C$ (W/m ² °C)	m_C (kg/s m ²)	T (L)	U_T (W/m ² °C)
Tipo placa plana	32	64	35	0,679	4,653	0,02	3200	3,5

Tabla 1. Datos del sistema solar para calentamiento de agua.

En los colectores solares de placa plana adoptados para este estudio, la radiación se transmite por una cubierta de vidrio y llega a una placa de aluminio recubierta con pintura absorbente selectiva. La

energía térmica se transfiere al agua que circula por tubos de cobre, entre la placa y la cubierta hay aire, se utiliza un aislante y una caja contiene todos los componentes de colector (Figura 2).

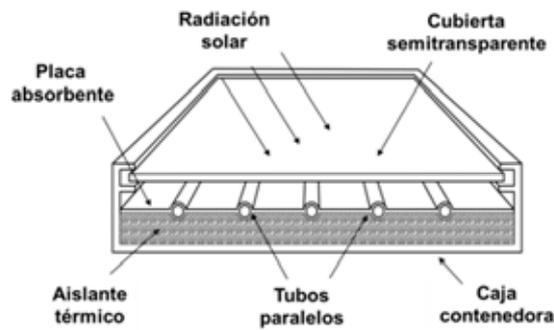


Figura 2. Colector solar de placa plana.

En relación con la configuración del conjunto de colectores se han considerado baterías constituidas por cuatro colectores solares en paralelo, pero a su vez las baterías pueden estar entre sí en paralelo, o en serie (Figura 3).

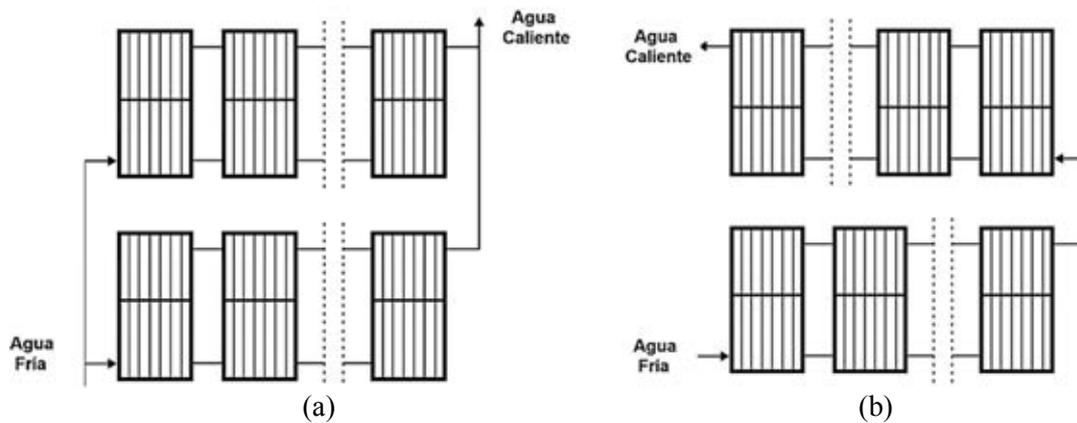


Figura 3. Baterías de colectores solares: en paralelo (a) , en serie (b).

Los parámetros característicos del colector se emplean para cálculos sin modificaciones solo cuando la instalación posee una configuración en la cual el caudal m_c es el mismo que el antes tabulado ($0,02 \text{ kg/s m}^2$), pero si este caudal es diferente los valores de $F_R E_O$ y $F_R U_C$ deben ser corregidos (Duffie y Beckman, 2013).

El caso base simulado considera que ocho baterías de cuatro colectores están todas configuradas en paralelo, y el caudal de agua circulante es relativamente bajo e igual a $0,01 \text{ kg/s m}^2$, por lo que el caudal total en la instalación es $0,64 \text{ kg/s}$. Mediante un diseño preliminar del circuito hidráulico se estiman las dimensiones de las cañerías, de las aislaciones correspondientes, y un consumo de 180 W para la bomba impulsora.

Cuando el sistema a simular contiene N equipos en serie y el caudal que circula es N veces el valor m_c contemplado en los parámetros $F_R E_O$ y $F_R U_C$ éstos no se modifican. Si en la configuración de la instalación se disponen N equipos en serie y el caudal circulante por cada colector cambia, los parámetros deben ser modificados según:

$$(F_R E_O)_N = F_R E_O [1-(1-K)^N / NK] \quad (1)$$

$$(F_R U_C)_N = F_R U_C [1-(1-K)^N / NK] \quad (2)$$

En las ecuaciones anteriores K se calcula con uno de los parámetros del colector, el caudal de agua por unidad de área y el calor específico del agua (C):

$$K = F_R U_C / C m_C \quad (3)$$

Al colocar las baterías de colectores en serie con un dado caudal circulante en cada colector, se incrementan las pérdidas térmicas debido al incremento de la temperatura, también la caída de presión y la potencia de la bomba de circulación. Asimismo con las baterías en serie, manteniendo el caudal total circulante, se pueden reducir las dimensiones del circuito hidráulico y las pérdidas de calor aumentando así el aporte solar a la demanda térmica.

CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE SAM

El software usado genera 8760 valores horarios, relacionados con datos de la radiación incidente sobre los colectores y fundamentalmente resultados del aporte de energía térmica de origen solar y la temperatura del agua suministrada. Se puede obtener también otra información horaria, mensual y para todo el año, pudiéndose modificar una serie de variables operativas y de la instalación en estudio. Este programa ha sido verificado mediante la aplicación de otros modelos más complejos como el conocido como TRNSYS (DiOrio et al., 2014).

Una vez localizado geográficamente el sistema solar se cargan en el programa de cálculo los valores de la radiación solar directa y difusa horizontal junto con otros registros climáticos, que están disponibles para América del Sur-WMO Región 3 -Argentina Typical Meteorological Year (EnergyPlus, 2017).

El software tiene varias opciones para hallar la radiación recibida por los colectores (I_T), con la radiación solar global horizontal (I), que es suma de la radiación directa del sol (I_D) y la radiación difusa del cielo (I_d). La radiación solar sobre los colectores se obtiene en este caso con el modelo anisotrópico HDRK (Duffie y Beckman, 2013). El modelo contempla el índice de anisotropía (A_i), el cociente entre la radiación directa en los planos inclinado y horizontal (R_D) y la reflectividad de los alrededores (r):

$$I_T = (I_D + I_d A_i) R_D + I_d (1-A_i) (1+\cos B)/2 [1 + (I_D/I)^{1/2} \sin^3 (B/2)] + I r (1-\cos B)/2 \quad (4)$$

Por otra parte la demanda periódica de energía térmica (Q_d) se calcula con la masa, el calor específico, y las temperaturas del agua caliente y fría. Para cubrir esa demanda, los colectores solares convierten parte de la radiación recibida y como existen pérdidas de calor desde las cañerías y el tanque acumulador hacia el ambiente, se dispone realmente de una cantidad inferior de energía de origen solar (Q_e).

El aporte de la energía solar a la demanda térmica (F_s) resulta:

$$F_s = Q_e / Q_d \quad (5)$$

A su vez se usa energía auxiliar (Q_a) con el fin de completar la demanda térmica, por lo que:

$$Q_d = Q_e + Q_a \quad (6)$$

Se debe tener en cuenta para la evaluación completa de la instalación que se consume energía eléctrica para el funcionamiento de la bomba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos de la radiación solar directa y difusa horaria horizontal y considerando que r es 0,20, el software determina la radiación total incidente sobre los equipos solares, cuyos valores están por encima de 1000 W/m^2 en pocos días del año (Figura 4).

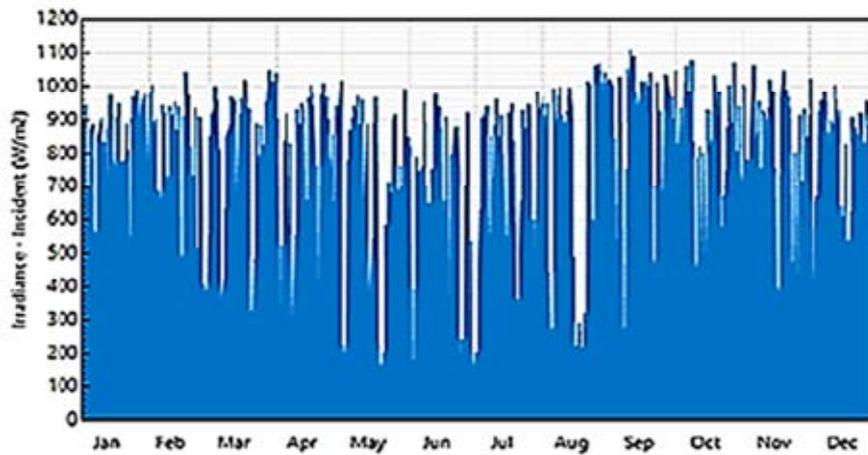


Figura 4. Radiación solar incidente sobre los colectores.

Como se observa en la Figura 5 para el sistema con las ocho baterías de colectores en paralelo, en muchos meses la temperatura del agua proveniente de la instalación supera los $85 \text{ }^\circ\text{C}$.

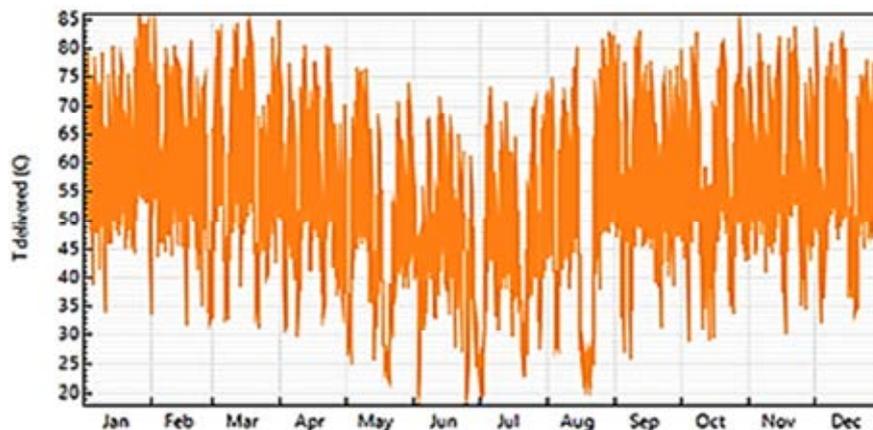


Figura 5. Temperatura del agua proveniente del tanque acumulador.

Según los cálculos efectuados para el caso base, la demanda térmica anual para calentamiento es $Q_d=31749,6 \text{ kWh}$, y la cantidad de energía térmica solar suministrada por la instalación solar varía desde 2761 kWh en enero hasta 1881 kWh en junio, siendo relativamente elevada en varios meses y horas del día (Figura 6). La fracción de la demanda térmica cubierta con energía del sol es $F_s=0,818$, por lo que la instalación posibilita en un año calentar hasta $60 \text{ }^\circ\text{C}$ unos 597140 L de agua o sea 9330 L de agua por m^2 de colector, y la energía consumida por la bomba es muy baja ($P_b= 347,7 \text{ kWh}$).

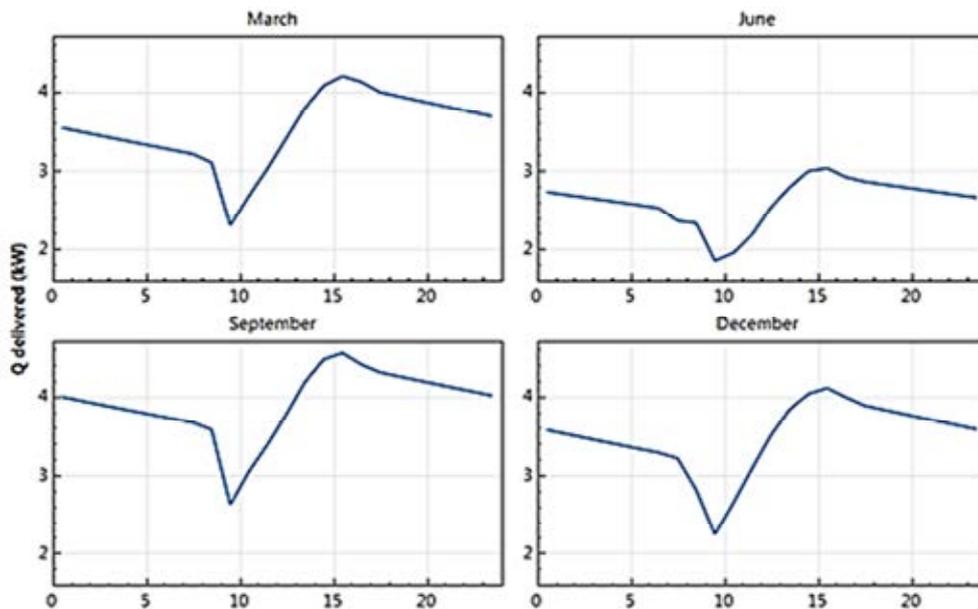


Figura 6. Energía suministrada por el sistema solar en meses típicos.

En función de las posibilidades que ofrece el software SAM, se considera a continuación la modificación de algunas de las variables del cálculo anteriormente realizado, y se determina su influencia en el comportamiento anual de la instalación solar previamente analizada.

Para construir la Tabla 2 se han modificado cuatro variables relacionadas con los colectores solares y el tanque acumulador de agua.

Variable modificada		Q_a (kWh)	Q_e (kWh)	P_b (kWh)	F_s
Inclinación de los colectores (°)	30	5867,0	25882,6	348,2	0,815
	35	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	40	5889,9	25859,7	342,3	0,814
Parámetro de pérdidas del colector ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	4,0	5232,5	26517,1	355,6	0,835
	4,653	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	5,0	6078,4	25671,2	344,6	0,809
Volumen de agua del tanque (L)	3000	5743,2	26006,4	349,6	0,819
	3200	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	3500	5861,0	25888,6	346,5	0,815
Coeficiente de pérdidas del tanque ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	3	5393,1	26356,5	344,9	0,830
	3,5	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	4	6181,4	25568,2	351,5	0,805

Tabla 2. Estudio sobre variables relacionadas con los colectores y el tanque acumulador.

En la tabla Q_a es la cantidad de energía auxiliar que sumada a Q_e completa la demanda térmica prevista. Se concluye que el valor óptimo de la inclinación de los colectores (35°) es de unos tres grados por encima la latitud de Santa Fe y que un aumento en el volumen de agua acumulado disminuye levemente el valor del aporte solar anual F_s , ya que crece el área de pérdida de calor al ambiente. Como es esperable, un efecto similar producen los aumentos de los coeficientes de pérdidas en los colectores y en el tanque de acumulación.

La Tabla 3 se elabora modificando dos variables operativas, y la configuración de las baterías de colectores solares.

Variable modificada		Q _a (kWh)	Q _e (kWh)	P _b (kWh)	F _s
Potencia de la bomba (W)	150	5779,6	25970,0	289,7	0,818
	180	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	210	5779,6	25970,0	405,6	0,818
Caudal total circulante (kg/s)	0,64	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	0,96	5807,0	25942,6	347,0	0,817
	1,28	5821,6	25928,0	346,6	0,817
Configuración de las baterías	8P - 180 W	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	4P/2S - 220 W	5592,2	26157,4	428,6	0,824
	2P/4S - 320 W	5521,2	26228,4	624,0	0,826

Tabla 3. Estudio sobre variables operativas y de configuración del sistema solar.

En principio se ve en la tabla que una mayor potencia consumida por la bomba (P_b) no reduce el valor de la fracción F_s ya que esta potencia no participa en el balance térmico del sistema. Además un significativo aumento del caudal total circulante por la instalación provoca solo una leve disminución de dicha fracción y no trae beneficios en el comportamiento térmico.

Con respecto a la configuración de las baterías de cuatro colectores, 8P refiere al caso original con ocho baterías en paralelo, 4P/2S a cuatro en paralelo y dos en serie, y 2P/4S a dos en paralelo y cuatro en serie. En los dos últimos casos manteniendo el caudal total en 0,64 kg/s, se rediseñan las cañerías y aislaciones y como el caudal en cada colector crece a 0,02 kg/s m² y 0,04 kg/s m² se fijan nuevas potencias de la bomba.

Luego, al efectuar los cálculos se comprueba que con configuraciones que tienen más colectores en serie se aumenta el aporte solar a la demanda térmica, llegándose a 82,4 % y 82,6 %, cuando se colocan dos y cuatro baterías en serie respectivamente. Con el mayor número de baterías en serie la energía térmica solar entregada Q_e crece un 1,0 %, mientras que el consumo de la energía auxiliar Q_a disminuye aproximadamente en un 4,5 %.

Debe notarse que en los casos referidos antes, se necesitan mayores valores de la potencia necesaria para el bombeo porque crecen el caudal circulante por colector y el número de éstos en serie. Paralelamente el rediseño del circuito hidráulico con la reducción de sus dimensiones y consiguientemente de las pérdidas de calor al ambiente, dar lugar a un aumento de la contribución solar a los requerimientos de energía térmica.

CONCLUSIONES

El software System Advisor Model (SAM) posibilita analizar detalladamente el comportamiento de instalaciones solares para calentar agua. Los datos horarios de la radiación solar, variables climáticas locales, cantidad y temperatura del agua requerida, y características de los colectores para captación y del tanque acumulador, se encuentran entre los más importantes para posibilitar el uso del programa.

Los resultados de la aplicación del SAM indican que para una instalación que requiere energía en forma constante a lo largo del año y tiene colectores planos selectivos en baterías de cuatro colectores colocadas todas en paralelo, el sistema solar aporta el 81,8 % de la demanda. Se calcula también que es posible calentar 9330 L de agua por m² de colector a 60°C de temperatura, la inclinación óptima de los colectores solares (35°) es algo mayor que la latitud de la localización, y el crecimiento del volumen acumulado produce una disminución del aporte solar a la demanda. Asimismo se observa que el crecimiento de la potencia de bombeo y del caudal total que circula por la instalación no influyen sobre el comportamiento térmico de la misma.

Finalmente al comparar diversos arreglos de la instalación manteniendo el caudal total de circulación, se verifica que los equipos en serie provocan un crecimiento de la fracción de energía solar que cubre la demanda térmica hasta 0,826 al colocar de ese modo cuatro baterías. En estas condiciones se aumenta la energía solar térmica entregada, y se disminuye la energía auxiliar necesaria para el calentamiento del agua. Sin embargo debe recalarse que en estas configuraciones es mayor la potencia necesaria de bombeo debido al mayor caudal circulante por cada colector y al posicionamiento de las baterías en serie.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral por el apoyo recibido para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Albizzati E. (2012). Energía solar térmica: principios básicos y aplicaciones tecnológicas. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 150 p.
- Albizzati E. (2016). Evaluación de la sustentabilidad de instalaciones solares con colectores de placa plana y de tubos evacuados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 315-322.
- ANSI/ASHRAE 93 (2010) Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, American National Standards Institute /American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- DiOrio N., Christensen C., Burch J., Dobos A. (2014). Technical Manual for the SAM Solar Water Heating Model. <https://sam.nrel.gov/resources>.
- Duffie J. A., Beckman W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. 4th ed., J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 910 p.
- EnergyPlus (2017). EnergyPlus Weather Data. <https://energyplus.net/weather>.
- Frein A., Calderoni M., Mott M. (2014). Solar thermal plant integration into an industrial process. *Energy Procedia*, 8, 152-1163.
- Kalogirou S. (2014). Solar energy engineering: processes and systems, 2nd ed., Elsevier/Academic Press, Burlington, MA, USA, 840 p.
- Mamouri S., Bénard A. (2018). New design approach and implementation of solar water heaters: a case study in Michigan. *Solar Energy*, 162, 165-177.
- REN21, Renewables 2018 Global status report (2018). REN21, <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>.
- Yan C., Wang S., Ma Z., Shi W. (2015). A simplified method for optimal design of solar water heating systems based on life-cycle energy analysis. *Renewable Energy*, 74, 271-278.
- Zainine M., Mezni T., Dakhlaoui M., Guizani A. (2017). Energetic performance and economic analysis of a solar water heating system for different flow rates values: a case study. *Solar Energy*, 147, 164-180.

ABSTRACT

In this work, medium scale solar systems for water heating with System Advisor Model software are simulated. The most important variables that are charged in the program are solar radiation, local meteorological data, demand profile, hot water temperature, and technical information about the solar collectors and the storage tank. The results indicate that for an installation of selective flat collectors with all batteries in parallel, 9330 L of water per m² of collector are heated to 60 °C, which represents 81.8 % of the annual thermal demand. In addition, the optimum inclination of the collectors is greater than the latitude of Santa Fe and an increase in the accumulated volume decreases the contribution of solar energy. Finally, if the total circulation flow is maintained, it is verified that by placing four batteries in series the solar contribution is 82.6%, the solar thermal energy delivered increases and the auxiliary energy for heating decreases. In these configurations the power for pumping is greater due to the increase of flow rate in each collector and the arrangement of batteries in series.

Keywords: solar, heating, water, collectors, energy.

ARQUITECTURA SUSTENTABLE. AJUSTE DEL PROGRAMA DE BALANCE TÉRMICO EN EL CÁLCULO DE ENERGÍA AUXILIAR DE CALEFACCIÓN

Esteves A.^{1,2}, Scalia A.¹, Gelardi D.¹

¹ Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD) – Universidad de Mendoza (UM)
Mendoza – Argentina - Tel.: 54 (0)261-4202017 – email: alfredo.esteves@um.edu.ar

² INAHE – CCT CONICET Mendoza – Av. Ruiz Leal s/n – Mendoza – Argentina

Recibido 14/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: la enseñanza de la arquitectura bioclimática y sustentable requiere de pasos concretos hacia la incorporación de estrategias de conservación de energía y sistemas pasivos de acondicionamiento ambiental. Se elaboró el programa de Balance Térmico de Edificios Sustentables, (BTES) que permite obtener datos para el anteproyecto respecto de espesores de aislamiento térmico y sistemas pasivos de calefacción. En 2017 fue ampliado a otros sistemas pasivos. Se presenta el ajuste estudiado en las respuestas de consumo de energía auxiliar, analizando los casos de 7 viviendas, 3 bioclimáticas y 4 de construcción tradicional, con variedad de mampostería y techos que permiten conocer el grado de ajuste de los resultados obtenidos. Estos resultan para valores anuales $R^2=0,9493$ y para valores bimestrales $R^2=0,8623$, de acuerdo a como se factura el consumo de gas natural, concluyendo que el programa (BTES) una herramienta apropiada para conocer, en etapas de anteproyecto, el comportamiento edilicio ante la incorporación de diferentes estrategias bioclimáticas.

Palabras clave: arquitectura bioclimática, energía demandada, transferencia de conocimientos.

INTRODUCCIÓN

En el año 2004 se presentó un programa de Balance Térmico de Edificios Sustentables (Esteves y Gelardi, 2003), el mismo también se expuso en el ámbito del Mercosur (Esteves et al., 2004). En el mismo se consideran las características del edificio, tales como estudio de la forma (Factor de Forma, FF y Factor de Área Envolvente/Piso, FAEP); Balance Térmico de Calefacción, con la posibilidad de calcular la Fracción de Ahorro Solar anual, el consumo auxiliar, el cálculo del coeficiente G (IRAM 11604) y la potencia de calefacción.

Presenta también el balance de enfriamiento, tomando en cuenta la ganancia en el día más crítico del año para dimensionar los sistemas de aire acondicionado mecánico. En el año 2017 fue ampliado y se incorpora la posibilidad de calcular la masa térmica necesaria para amortiguar el calentamiento de verano, las aberturas para enfriamiento convectivo (para aquellos climas cálidos secos) y aberturas para ventilación natural de confort.

En el sector edilicio, los edificios no se encuentran preparados con sistemas de conservación de energía; por lo tanto, es mucho lo que se puede hacer al respecto. Cuando se trata de incorporar estrategias de conservación de energía y/o sistemas pasivos de calefacción y enfriamiento, se debe recurrir a programas que permiten obtener datos lo más certeros posibles. Flores Larsen y Lesino (2000) y Flores Larsen (2001) presentan el programa SIMEDIF para Windows muy versátil y con grado de ajuste importante en el camino de las temperaturas interiores del edificio con sistemas pasivos. Hernández por su parte, ha realizado un programa que permite obtener datos en forma más rápida PREDISE -V.1.0.1 (Hernández, 2002). Es opinión de los autores que los programas de cálculo deben ser sencillos de utilizar, sobre todo en etapas de anteproyecto, donde la integración de los sistemas todavía es posible y “*donde son tomadas las decisiones más importantes*” (Nielsen, 2005)

Desde el IRAM y el Ministerio de Energía se ha alentado a desarrollar la norma IRAM 11900 la que permitiría contar con una etiqueta del edificio, caracterizando su envolvente, tanto opaca como transparente y determinar además las posibilidades de mejoramiento del edificio incorporando varios aspectos como ventilación, sistemas solares pasivos y activos. Sin embargo, al momento se encuentra en proceso de entrenar profesionales que puedan aplicarla (IRAM 11900, 2010).

El programa de Balance Térmico de Edificios Sustentables (PBES), siempre fue en esa dirección, es decir, tratar de incorporar variables que permitan rápidamente, de forma amigable, obtener datos fundamentales a la hora de proyectar el edificio. Se presenta entonces el ajuste dado a las variables de calor auxiliar anual y mensual obtenida para el edificio en cuestión, cuando el mismo se está proyectando.

Para esto, en este trabajo se presenta el calor auxiliar calculado para 7 edificios, 3 de ellos bioclimáticos y 4 de construcción tradicional, de éstos dos con mampostería de ladrillo macizo y dos de ladrillo hueco. A cada uno se estudia para determinar el grado de ajuste de su respuesta con el PBES comparado con los consumos reales. El grado de ajuste que se obtiene con el programa nos permite determinar la certeza de las variables obtenidas.

METODOLOGÍA

La metodología a implementar en este trabajo sigue los siguientes pasos:

- 1- Mediciones de condiciones interiores de temperatura y humedad relativa. La idea es determinar por un lado a qué temperatura los usuarios mantienen el edificio y cómo es su evolución en las distintas horas. Dado que se trata de edificios residenciales y se toman mediciones de por lo menos una semana, los registros obtenidos permiten inferir las temperaturas a las cuales, los usuarios viven. Por otro lado, se sabe que la humedad relativa interior, sobretudo en climas templados continentales, se encuentra en valores intermedios a la humedad relativa exterior (Esteves Miramont, 2017). De ese modo podemos conocer también entre qué límites se mantiene la humedad relativa interior.
- 2- Se determina la temperatura interior media, que permite obtener los grados-día de calefacción para cada mes, mediante la metodología desarrollada en un trabajo previo (Esteves y Gelardi, 2008). La ecuación 1 relaciona los grados-día mensuales con la temperatura interior media (que aquí se asimila a la temperatura base, T_b).

$$\begin{aligned} \text{GDCm} &= -0,0274(T_b - T_a)^3 + 1,1447(T_b - T_a)^2 + 16,653(T_b - T_a) + 46,369 \\ R^2 &= 0,9979 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

GDCm= Grados-día de calefacción mensual [C.día/mes]

T_b = Temperatura base (aquí asimilada a la temperatura interior media) [C]

T_a = Temperatura media mensual del aire exterior [C]

R^2 = índice de determinación

- 3- Se aplica el Balance Térmico al edificio determinando la Fracción de Ahorro Solar Mensual del mismo y de ese modo el consumo de energía auxiliar mensual. Para esto, se tiene en cuenta los GDCm e incorporando estos valores en la relación de RS/GD en el cálculo de la Fracción de Ahorro Solar mensual (FASm).
- 4- Paralelamente se procesa la información de las facturas de gas natural, teniendo en cuenta la cantidad de personas que viven en la vivienda y el consumo de gas natural de verano. Se calcula el consumo de combustible para calentamiento de agua y para cocción ajustando para el bimestre de pleno verano, ya sea Dic-Ene o Ene-Feb. Luego calcula el consumo de agua caliente tomando en cuenta la variabilidad de la temperatura del agua a lo largo del año, teniendo en cuenta la

variabilidad de la temperatura mínima media del aire, de acuerdo a la metodología de Censolar, (1989).

- 5- Una vez determinado el consumo en agua caliente y cocción, se resta este valor del consumo del mes y se determina de ese modo, el valor incurrido en el rubro calefacción.
- 6- Se calcula luego el valor consumido en el bimestre/año con el valor calculado por utilizando el programa de BTES.

Listado de edificios considerados

Se han estudiado 7 viviendas, 3 bioclimáticas y 4 de construcción tradicional, cubriendo una variedad de materiales, techos horizontales de losa, inclinados livianos, muros de mampostería de ladrillo macizo, ladrillo hueco y hasta cerramientos livianos verticales. También con y sin masa térmica. A continuación la descripción de los edificios, las mediciones y los consumos de energía y la determinación de la temperatura interior y los consumos.

1- Vivienda Bioclimática en Guaymallén, Mendoza.

Localización geográfica: en Guaymallén, Mendoza. Coordenadas: Latitud 32,92° S; Longitud 68,80° W; Altitud 767 msnm. Clima: semidesértico con clima templado frío. Forma: El FAEP resulta muy elevado = 3,7 m²/m². La Figura 1 muestra la fachada N de la vivienda.



Figura 1: Caso 2, vista de la fachada N de la vivienda. Se observa ventanas de ganancia directa con cortinas de totora como sombra temporal y aleros fijos de sombra permanente.

Muros: de mampostería de ladrillón de 0,17 m de espesor, bolseado interiormente y por el exterior con aislamiento térmico de 4,5 cm en muros y protección conformada de malla de acero electrosoldada de 4,2 mm de espesor y revoque de concreto. La Figura 1 muestra la fachada N y parte de los techos. Estos son en parte inclinados y en parte horizontales: a) inclinados: machimbre interior de ¾" de espesor, barrera de vapor de ruberoid (cartón embreado) al 200 %, aislamiento térmico de 5 cm de lana de vidrio en techos y terminación con teja francesa; b) horizontales: de losa cerámica con pintura asfáltica como barrera de vapor, 5 cm de poliestireno expandido, 10 cm de espesor medio de hormigón alivianado con perlas de poliestireno expandido para dar pendiente y membrana asfáltica con aluminio. Ventanas y puertas ventanas de madera, con simple contacto y burletes. Algunas ya poseen DVH y todas poseen cortina de enrollar de totora. Posee un invernadero adosado con carpintería de aluminio con vidrio simple (laminado 3+3).

Sistemas pasivos: ganancia directa con vidrio simple y con aislamiento nocturno (persianas de totora) e invernadero adosado y masa térmica para acumulación de energía solar en invierno.

La Figura 2 (izq.) muestra las temperaturas interiores registradas cuya media se encuentra en 18,5 °C. También indica los consumos bimestrales distribuidos en los distintos destinos, cocción y agua caliente y calefacción. Los valores resultan los indicados en la Tabla 1.

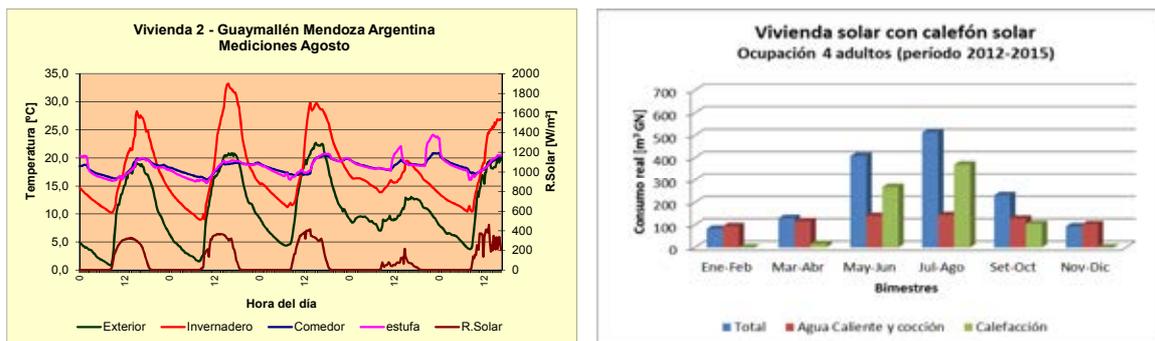


Figura 2: mediciones térmicas en el interior y consumos de energía desagregados por calentamiento de agua y cocción y calefacción.

La Figura 2 (izq.) muestra las temperaturas interiores registradas cuya media se encuentra en 18,5°C. También indica los consumos bimestrales distribuidos en los distintos destinos, cocción y agua caliente y calefacción. Los valores resultan los indicados en la Tabla 1.

2- Vivienda en Chacras de Coria, Luján de Cuyo, Mendoza.

Localización geográfica: en Chacras de Coria, Luján de Cuyo. Coordenadas: Latitud 32,99° S; Longitud 68,89° W; Altitud 960 msnm. Clima: semidesértico con clima templado frío.

Forma: el FAEP para la vivienda es de 1,99. Muros: ladrillón de 0,17 m de espesor, revocado interiormente y por el exterior, con aislamiento térmico de poliestireno expandido de 4,5 cm en muros y protección conformada de malla de acero electrosoldada de 4,2 mm de espesor y revoque de concreto. Techos: a) Inclinados: machimbre interior, barrera de vapor de membrana asfáltica con aluminio, aislamiento térmico de 1,5 cm de poliestireno expandido más 5 cm de lana de vidrio en techos y terminación de teja de cemento gris (Figura 3). b) Horizontales: losa alivianada pintura asfáltica como barrera de vapor, 5 cm de poliestireno expandido, 10 cm de hormigón alivianado con perlas de poliestireno expandido para dar pendiente, carpeta alisada, pintura imprimante y membrana asfáltica con aluminio.

Bimestres	Ene-Feb	Mar-Abr	May-Jun	Jul-Ago	Set-Oct	Nov-Dic	Total anual
Total bimestral	82.7	130.3	408.7	513.3	232.0	93.3	1460.3
Agua caliente y cocción	85.2	103.8	124.5	127.3	113.7	92.8	647.3
Calefacción consumida	0.0	26.5	284.2	386.0	118.3	0.5	815.6
Calefacción calculada	0.0	23.6	391.6	444.8	97.9	0.0	957.9

Tabla 1: valores consumidos de gas natural y calculados según el programa de BTES.

Ventanas y puertas ventanas de madera de cedro simple contacto sin burletes. Presencia de vidrio fijo en frente NE. Las aberturas N, poseen postigos de madera cerrados (salvo ventana de cocina) utilizados para reducir las pérdidas térmicas nocturnas en invierno y en el día de verano para proteger de la radiación solar (sombra temporal). La Fig. 3 muestra la fachada N, NE y NO.

Sistemas pasivos: ganancia directa con vidrio simple y con aislamiento nocturno (postigos de madera ciegos) como sistema de calefacción.

En la Figura 4 se puede observar la marcha de la temperatura interior de la zona del estar y de los dormitorios. La temperatura interior media se sitúa en 21,7 °C, teniendo en cuenta que los dormitorios se encuentran a 20,3 °C y la zona de estar-comedor y cocina a 23,2 °C.

En la Tabla 2, se indican los consumos bimestrales para agua caliente y cocción y para calefacción consumida y calculada con el PBTE. También se indican los valores totales anuales.



Figura 3: Vista de la fachada N, NE y NO con presencia de ventanas y puertas ventanas con postigones cerrados para la sombra temporal y aleros fijos para la sombra permanente.

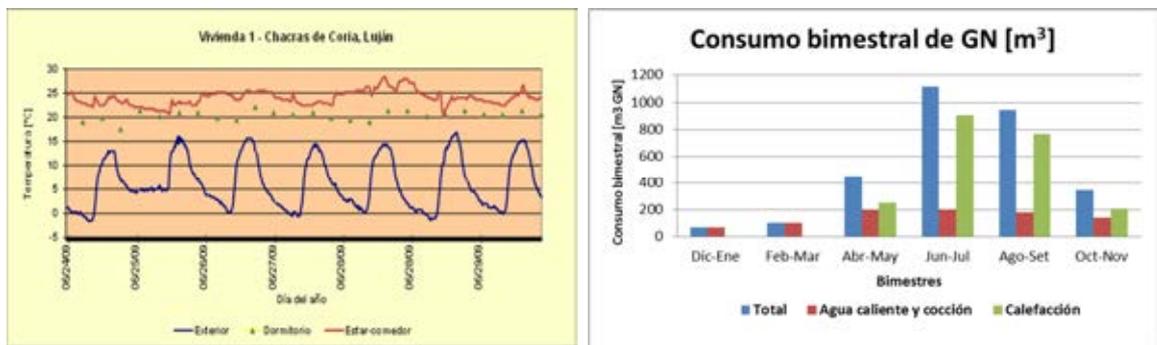


Figura 4: mediciones térmicas en el interior y consumos de energía desagregados por calentamiento de agua y cocción y calefacción.

Bimestres	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Jun-Jul	Ago-Set	Oct-Nov	Total anual
Total bimestral	68,0	103,0	452,0	1113,0	950,0	350,0	3036,0
Agua caliente y cocción	68,0	103,0	198,5	202,1	178,3	140,2	890,0
Calefacción consumida	0,0	0,0	253,5	910,9	771,7	209,8	2146,0
Calefacción calculada	0,0	0,6	395,1	1010,3	597,6	63,7	2067,3

Tabla 2: valores consumidos de gas natural y calculados según el programa de BTES.

3- Vivienda de construcción tradicional de mampostería de ladrillo macizo en Luján de Cuyo

Localización geográfica: en Chacras de Coria, Luján de Cuyo. Coordenadas: Latitud 32,99° S; Longitud 68,89° W; Altitud 956 msnm. Clima: semidesértico con clima templado frío. El FAEP resulta elevado = 2,5 m²/m². Muros: de mampostería de ladrillón de 0,17 m de espesor, bolseado exterior y revocado interior. Ver Figura 5.

Techos: son inclinados machimbre interior de 5/8", barrera de vapor de ruberoid al 200%, aislamiento térmico de 5 cm de lana de vidrio en techos y terminación con teja francesa (Ver Figura 5). Ventanas: Carpintería standard de madera, simple contacto sin burletes con marco metálico y sin aislamiento nocturno, sólo cortinas livianas por el interior.

La Fig. 6 (izq.) muestra la temperatura interior y exterior para 4 días del mes de agosto. Se observan picos de temperatura que es cuando se enciende la calefacción. La curva verde corresponde al dormitorio de P.A. que no se calefacciona, tiene una baja oscilación térmica pero sus valores se encuentran totalmente fuera de confort, para la vestimenta normal. La temperatura media del estar es de 16,9 °C y la del dormitorio 15,1 °C dando una media de 16 °C para toda la vivienda. La Fig. 6

(der.) muestra los consumos reales de la vivienda. En el período considerado la ocupan 2 adultos. En la Tabla 3, se indican los consumos bimestrales para agua caliente y cocción y para calefacción consumida y calculada con el PBTE. También se indican los valores totales anuales.



Figura 5: imágenes de la galería abierta y del resto de la fachada N de la misma. Se observa que parte del estar y del dormitorio en PA posee exposición al N.

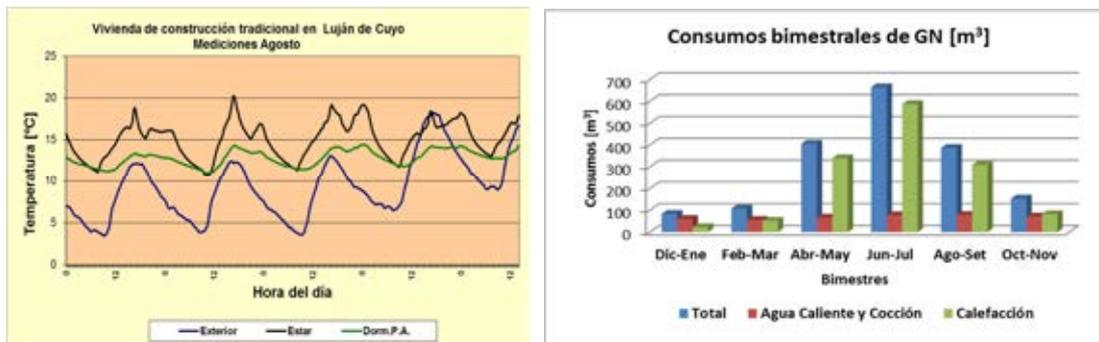


Figura 6: mediciones térmicas en el interior y consumos de energía desagregados por calentamiento de agua y cocción y calefacción.

4- Vivienda de construcción tradicional de ladrillo hueco en Luján de Cuyo

Localización geográfica: en Chacras de Coria, Luján de Cuyo. Coordenadas: Latitud 32,99° S; Longitud 68,89° W; Altitud 951 msnm. Clima: semidesértico con clima templado frío.

El FAEP resulta de 2,06 m²/m², por lo cual, resulta en una forma compacta y racional. Muros: de mampostería de ladrillo hueco y estructura de hormigón armado de 0,20 m de espesor, con revoque de hormigón por el exterior y de yeso aplicado por el interior. Techos: horizontales. se utilizó losa alivianada con aislamiento térmico de 5 cm de lana de vidrio, hormigón alivianado para dar pendiente y terminado con membrana como aislación hidrófuga. Ventanas: carpintería standard de madera de

Bimestres	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Jun-Jul	Ago-Set	Oct-Nov	Total anual
Total bimestral	83,3	108,0	406,0	664,5	387,0	153,7	1802,5
Agua caliente y cocción	60,7	55,7	66,2	77,3	78,4	71,6	409,9
Calefacción consumida	22,6	52,3	339,8	587,2	308,6	82,1	1392,6
Calefacción calculada	0,0	0,0	365,8	805,4	489,4	0,0	1660,6

Tabla 3: valores consumidos de gas natural y calculados según el programa de BTES.

álamo de un solo contacto sin burletes y sin aislamiento nocturno, sólo cortinas por el interior. Ver Fig. 7. La vivienda fue ampliada en 2002, sin embargo, aquí no se considera, dado que se trata de una lavandería que nunca es calefaccionada.



Figura 7.: vivienda de construcción tradicional en ladrillo hueco. Izq. se observa la galería sobre fachada Este; der. se observa el frente N de los dormitorios.

La Figura 8 (izq.) muestra los valores para el mes de Mayo, con temperaturas exteriores entre 5 °C y 20 °C. Se observa constancia de las temperaturas interiores en la construcción de ladrillo hueco, sin embargo, es de destacar que la vivienda posee dos estufas de tiro balanceado que quedan encendidas todo el día. Esto genera una máxima en horas de la noche, dado principalmente por el aporte de calor auxiliar y menor pérdida por infiltración a estas horas. La temperatura interior considerada resulta 23,3 °C.

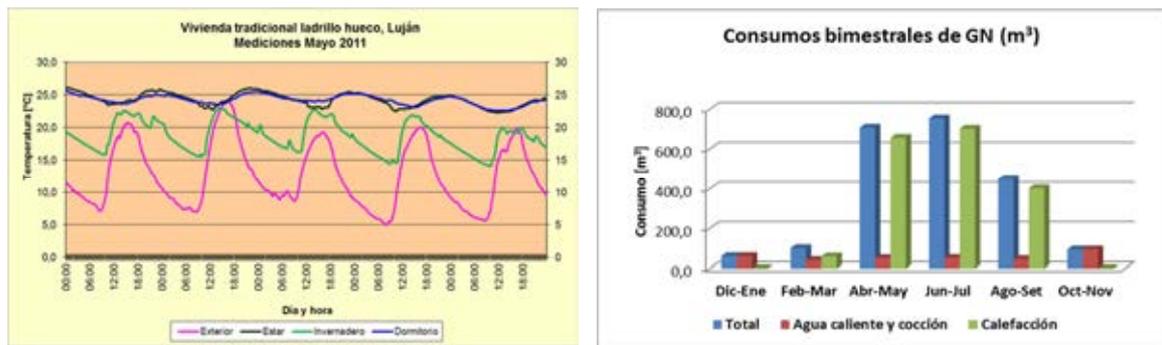


Figura 8: mediciones térmicas en el interior y consumos de energía desagregados por calentamiento de agua y cocción y calefacción.

Los consumos de la vivienda promediados para varios años se pueden observar en la Figura 8 (der.). En la Tabla 4, se indican los consumos bimestrales para agua caliente y cocción y para calefacción consumida y calculada con el PBTE. También se indican los valores totales anuales.

Bimestres	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Jun-Jul	Ago-Set	Oct-Nov	Total anual
Total bimestral	60,8	100,8	707,2	753,6	448,0	94,4	2164,8
Agua caliente y cocción	60,8	41,7	50,6	51,5	46,0	94,4	345,0
Calefacción consumida	0,0	59,1	656,6	702,1	402,0	0,0	1819,8
Calefacción calculada	0,0	0,5	397,9	981,0	593,7	0,0	1973,2

Tabla 4: valores consumidos de gas natural y calculados según el programa de BTES.

5- Vivienda liviana con conservación de energía en Godoy Cruz, Mendoza

La Vivienda se encuentra ubicada en la Calle 25 de Mayo de la Ciudad de Godoy Cruz, Mendoza, Argentina. (32,90° latitud sur, 68,85° longitud oeste y 792 m.s.n.m.). Se encuentra en un terreno en esquina, de reducidas dimensiones (100 m²). La vivienda, inicialmente de una planta, ha sido

construida con estructura de H^oA^o, mampostería de ladrillo hueco revocado en ambos lados con revestimiento vítreo exterior y cubierta de losa maciza de H^oA^o.

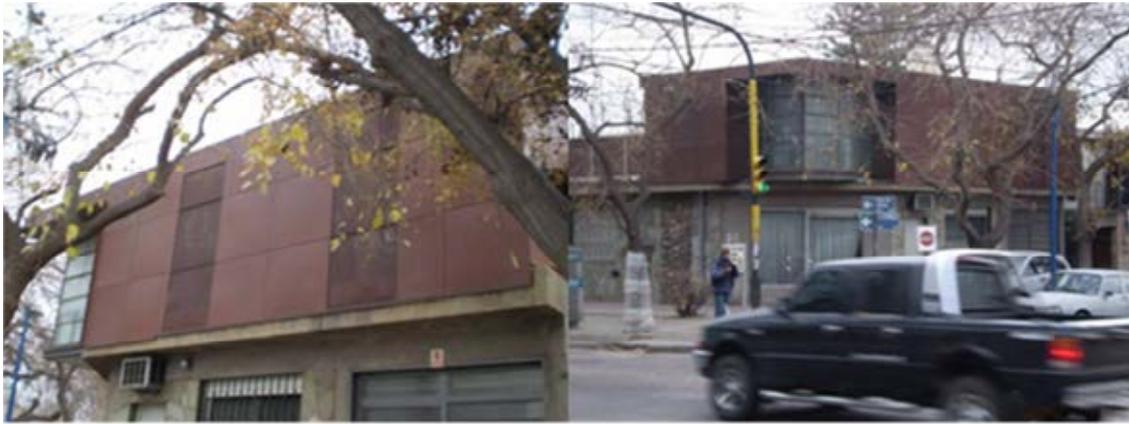


Figura 9: vivienda de construcción tradicional en ladrillo hueco. Izq. se observa la galería sobre fachada Este; der. se observa el frente N de los dormitorios.

La ampliación realizada sobre la terraza, por razones sísmicas se ha construido con materiales livianos: la estructura está conformada por un sistema de 2 vigas reticuladas de 2,40 m de altura, ubicadas en los dos lados mayores de un rectángulo de 10 x 5 metros, según cálculo estructural y verificación sísmica el diseño estructural. La separación entre ambos se completa con correas de perfiles C de 120 mm c/50 mm. La envolvente de esta estructura consta de una chapa exterior, con una capa aislante de espuma de poliuretano expandido proyectado por soplete con un espesor de 2” ½. Este material y su particular aplicación, garantiza cubrir toda la superficie de chapa otorgándole la reducción de la transmitancia térmica. El valor de conductancia térmica del muro resulta $K= 0,52 \text{ W/ m}^2$ (Gelardi et al., 2012); el revestimiento interior del aislante térmico es de placas de roca de yeso. La Fig. 9 (izq.) se observa la P.A. y la chapa exterior, también se observa que en coincidencia con las ventanas se colocó una chapa perforada. En la Fig. 9 (der.) se muestra la vivienda total PB y PA desde el frente en esquina.

La figura 10 (izq.) muestra los valores de temperatura para el dormitorio de planta alta (construcción nueva) y para el estar-comedor, ubicado en la planta baja. Como se puede apreciar, la construcción nueva genera temperaturas interiores más elevadas durante el día y valores de temperatura cercanas a la mínima existente en la planta baja en las noches. Se observa una elevada amplitud térmica, producto del sistema constructivo liviano. La temperatura interior media fue de 22,3 °C.

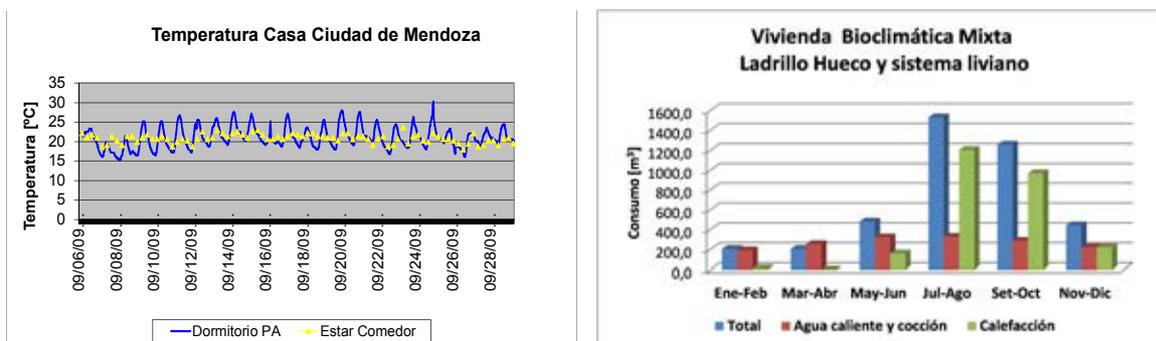


Figura 10.: vivienda de construcción tradicional en ladrillo hueco y ampliación liviana con conservación de energía. (Izq.) se observa las temperaturas registradas; (der.) consumos.

En la Tabla 5, se indican los consumos bimestrales para agua caliente y cocción y para calefacción consumida y calculada con el PBTE. También se indican los valores totales anuales.

Bimestres	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Jun-Jul	Ago-Set	Oct-Nov	Total anual
Total bimestral	204,5	205,3	480,3	1529,5	1256,0	442,5	4118,0
Agua caliente y cocción	191,3	253,9	320,9	327,1	286,3	221,1	1600,5
Calefacción consumida	13,2	0,0	159,3	1202,4	969,7	221,4	2566,1
Calefacción calculada	65,4	2,9	508,2	1098,0	697,9	118,2	2490,6

Tabla 5: valores consumidos de gas natural y calculados según el programa de BTES.

6- Vivienda tradicional construida en ladrillo visto en Luján de Cuyo, Mendoza

Localización geográfica: en Chacras de Coria, Luján de Cuyo. Coordenadas: Latitud 32,99° S; Longitud 68,89° W; Altitud 951 msnm. Clima: semidesértico con clima templado frío. La vivienda está construida en dos plantas, la PA cubre parcialmente el techo de la P.B. La superficie cubierta suma 137 m².



Figura 11: vivienda tradicional construida en ladrillo visto. Se observa la construcción en PB con techo horizontal e liviano inclinado y parte de la construcción en PA.

El FAEP resulta de 2,17 m²/m². Muros: de mampostería de ladrillo visto por el exterior y revocado por el interior y de 30 cm de espesor. Estructura de hormigón armado de 0,20 m de espesor. Techos: a) horizontales: de losetas y viguetas, con aislamiento térmico de 5 cm de poliestireno expandido y relleno alivianado y membrana hidrófuga; b) inclinados: con teja exterior, 5 cm de lana de vidrio y machimbre interior de 5/8". Carpintería de madera de cedro, un solo contacto sin burletes y sin aislamiento nocturno, sólo cortinas por el interior (Ver Figura 11).

La Figura 12 muestra los valores para el mes de Mayo, con temperaturas exteriores entre 3 °C y 22 °C e interiores entre 17 °C y 23 °C. Se observa la variabilidad de las temperaturas interiores propia de la construcción sin aislamiento térmico en muros. Los consumos de la vivienda promediados para varios años se pueden observar en la Figura 12 (der.).

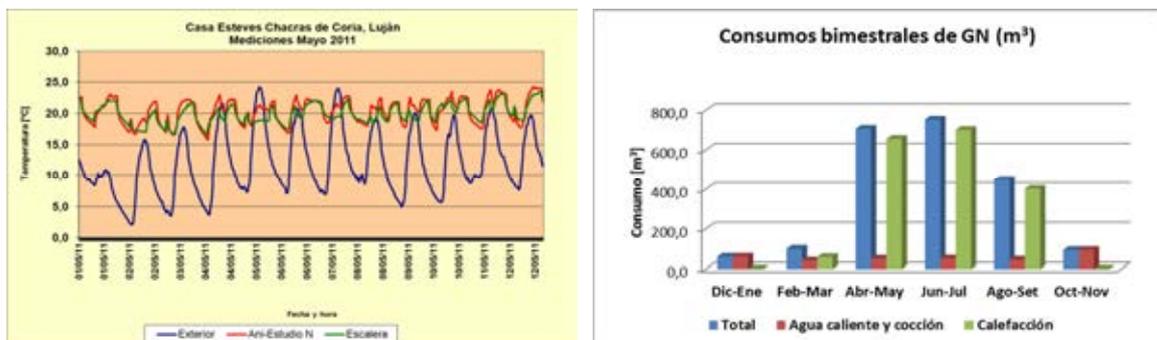


Figura 12.: vivienda de construcción tradicional en ladrillo visto: (Izq.) se observa las temperaturas registradas en Mayo; (der) consumos bimestrales.

En la Tabla 6, se indican los consumos bimestrales para agua caliente y cocción y para calefacción consumida y calculada con el PBTE. También se indican los valores totales anuales.

Bimestres	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Jun-Jul	Ago-Set	Oct-Nov	Total anual
Total bimestral	69,0	87,8	541,0	795,6	433,5	80,3	2007,3
Agua caliente y cocción	69,0	87,8	107,9	109,8	97,5	78,0	550,0
Calefacción consumida	0,0	0,0	433,1	685,9	336,0	2,3	1457,3
Calefacción calculada	0,0	0,0	335,5	758,1	462,1	70,9	1626,6

Tabla 6: valores consumidos de gas natural y calculados según el programa de BTES.

7- Vivienda tradicional construida en ladrillo macizo en Las Heras, Mendoza

La vivienda se ubica en el departamento de Las Heras, Mendoza. Su ubicación geográfica es latitud 32,86° S; longitud 68,80° W; 715 msnm. La vivienda total tiene un FAEP de 2,04 y cuenta con una superficie cubierta total de 144,3 m².



Figura 13: foto del frente (fachada Sur) de la vivienda en Las Heras, Mendoza.

La mampostería es de ladrillo macizo con dos revoques en su envolvente vertical. El techo es de losa alivianada con 5 cm de aislamiento térmico. En la PA se encuentra el estudio que funciona solamente durante las horas diurnas, por lo cual, no se tomará en cuenta para este estudio. Sólo se toma la parte de la vivienda que se encuentra en PB. Una foto de la fachada de la vivienda, que pertenece al Barrio UJEMVI, se puede observar en la Figura 13. En la Fig. 14 (izq.) se puede observar las temperaturas tanto de la zona de estar-comedor, como de la zona de dormitorios.

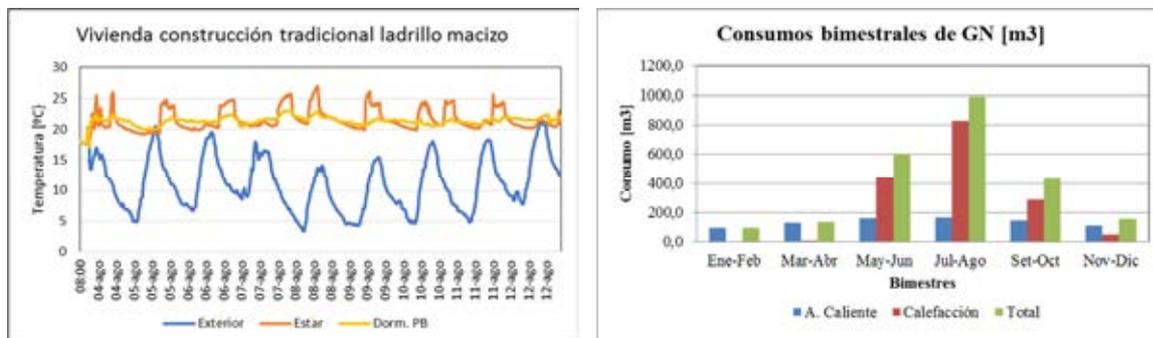


Figura 14: temperaturas registradas de la vivienda y consumos promedio de 3 años.

Se observan los picos de calefacción en la zona de estar (entre 18 °C y 25 °C) y la temperatura más constante en la zona de dormitorios (entre 20 °C y 23 °C). Tomando los promedios se obtiene una temperatura interior de 21,3 °C. En la figura 14 (der.) se pueden observar los consumos bimestrales promediados entre los años 2013 y 2017.

En la Tabla 7, se indican los consumos bimestrales para agua caliente y cocción y para calefacción consumida y calculada con el PBTE. También se indican los valores totales anuales.

Bimestres	Ene-Feb	Mar-Abr	May-Jun	Jul-Ago	Set-Oct	Nov-Dic	Total anual
Total bimestral	92,0	134,2	603,8	991,0	430,6	157,2	2408,8
Agua caliente y cocción	96,6	127,9	161,4	164,5	144,1	111,5	805,9
Calefacción consumida	0,0	6,3	442,4	826,5	286,5	45,7	1607,5
Calefacción calculada	0,0	86,5	667,6	737,6	249,3	0,0	1741,0

Tabla 7: valores consumidos de gas natural y calculados según el programa de BTES.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los valores que arroja el programa se encuentra el consumo mensual y anual del edificio en cuanto a gastos de calefacción. El consumo lo indica en 4 energéticos: energía eléctrica, gas natural, gas envasado, Kerosene y biomasa (leña).

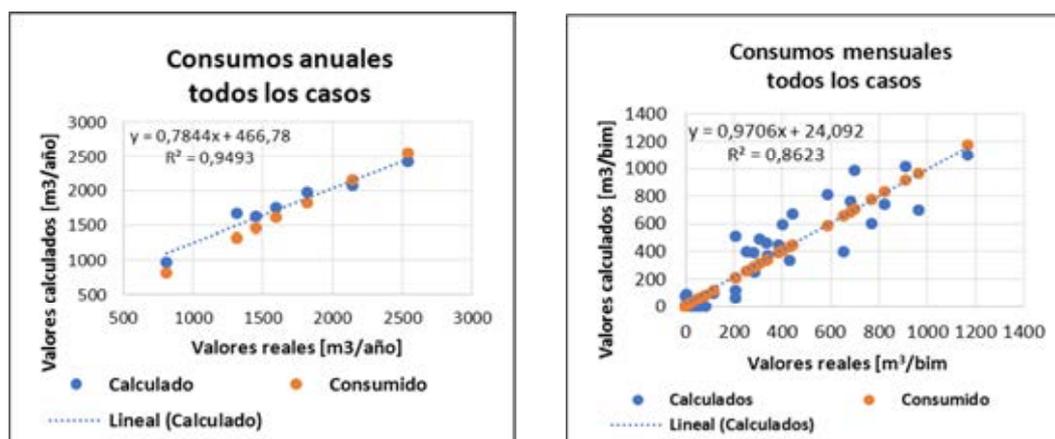


Figura 15: consumos reales vs. Calculados con el programa: (izq.) valores anuales; (der.) valores mensuales.

El consumo anual es lo que queda expuesto para el trabajo normal con el programa, mientras que el consumo mensual, queda oculto. En este caso, se ha hecho visible ambos tipos de consumo para poder conocer el grado de ajuste por bimestres, tal como viene la factura de gas natural.

El grado de ajuste anual se puede observar en la Fig. 15 (izq.) para el total de las viviendas indicadas aquí. Se observa que cuando los consumos son menores a 2000 m³ anuales, el programa da valores mayores de consumo estimado. La diferencia es variable, por debajo de 1000 m³ anuales produce consumos calculados del orden del 20 % más; entre 1000 y 1500 m³ anuales, el valor es mayor en el 10% y por encima de 2000 m³ anuales ajusta bien, para los consumos promediados de varios años (entre 3 y 7 años).

En cuanto al ajuste mensual, se debe indicar que resulta variable, si algún bimestre resulta de menos, al siguiente resulta de más y normalmente se compensa. Esto se puede observar en la Figura 15 (der.). También suele pasar que si no hay lectura, se hacen estimaciones que después se compensan, aunque al decir de ENARGAS, el valor de las lecturas estimadas es del orden del 3 % (ENARGAS, 2018).

Finalmente el valor estacional, es decir, el efecto que un año resulta más frío que otro, o más cálido tampoco se contempla, dado que el programa trabaja con temperaturas medias, promedio de por lo menos 10 años.

Sin embargo, teniendo en cuenta que es un programa de utilización sencilla, de apoyo a la etapa de anteproyecto para evaluar diferentes estrategias bioclimáticas aplicadas al edificio, resulta ser una herramienta interesante.

REFERENCIAS

- Censolar. (1989). Sistemas de aprovechamiento energético II – Tomo IV. Ed. PROGENSA – Promotora General de Estudios. Sevilla.
- ECOGAS. (2018). “Según Ecogas, qué hay que hacer si te llegó una factura de gas con lectura estimada”. Diario Los Andes, 27/07/2018. Secc. Economía. Fecha de consulta: 05/08/2018. <https://losandes.com.ar/article/view?slug=que-hacer-si-te-llego-una-factura-de-gas-con-lectura-estimada>.
- Esteves, A. Gelardi, D. (2003). Docencia en Arquitectura Sustentable: Programa de Optimización de Proyectos de Arquitectura basado en el balance térmico. Avances en energías Renovables y medioambiente, 7, N° 2, 10.31-10.34.
- Esteves A., Gelardi D. (2004). Optimización energética de edificios sustentables basada en un programa computacional que evalúa su forma y sus necesidades de calefacción y enfriamiento. Congreso Mercofrio (2004). Código del tema F3101. Porto Alegre, Brasil.
- Flores Larsen S. y Lesino G. (2000). SIMEDIF 2000: nueva versión del programa de diseño y cálculo de edificios. Rev. AVERMA Vol. 4, N° 2, pp.08.53-08.58. Ed. INENCO, Salta.
- Flores Larsen S., Lesino G. (2001). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios Rev. Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, pp. 15 – 24. Ed INENCO. Salta.
- Hernandez A.(2002). PREDISE – un novedoso y práctico programa de evaluación térmica de edificios. AVERMA Vol. 6, N° 2. 08.61 – 08.66. Salta, Argentina.
- Gelardi D., Esteves A., Barea G. (2012). Ampliación bioclimática de vivienda urbana con tecnología no tradicional. Rev. AVERMA. Vol. 16, 05-131,05-138. Impreso en la Argentina.
- NORMA IRAM 11900. (2010). Clasificación según la transmitancia térmica de la envolvente. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- Nielsen, T.R. (2005). Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. Solar Energy, 78 pp. 73-83. Ed. Elsevier.

ABSTRACT: The teaching of bioclimatic and sustainable architecture requires concrete steps towards energy conservation and passive system strategies incorporation in building. The Sustainable Buildings Thermal Balance Program (BTES) was developed (in 2003), which allows to obtain data for the preliminary project with respect to thermal insulation thicknesses and passive heating systems. In 2017 it was extended to other passive systems and this work presents the adjustment studied in the responses of consumption of auxiliary energy, analyzing the cases of 7 buildings, 3 bioclimatic and 4 of traditional construction, with variety of masonry and ceilings that allow to know the degree of adjustment of the results obtained . These result for annual values $R^2 = 0,9493$ and for bimonthly values $R^2 = 0,8623$, according to how the consumption of natural gas is billed, concluding that the program (BTES) is an appropriate tool to know, in preliminary stages, the behavior building in the way of the incorporation of different bioclimatic strategies.

Key words: bioclimatic architecture, auxiliary energy, knowledge transfers.

SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA SOLAR TÉRMICA DE GRAN ESCALA SITUADA EN LA LOCALIDAD DE SAN CARLOS, SALTA

Marcos Hongn, Ricardo Lozano, Germán Salazar

UNSa-INENCO - Avda. Bolivia 5150 - CP A4408FVY-Salta Capital - Salta-Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389 e-mail: marcoshongn@gmail.com

Recibido 14/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: En este trabajo se estima la producción de energía térmica y eléctrica mediante un modelo analítico (FAE) de una central solar térmica de concentración cilindro-parabólica de foco lineal. Las condiciones simuladas tienen referencia en la central SEGS VI de Kramer Junction, por lo que se consideró una potencia neta instalada de 30 MWe. El caso de estudio es una planta solar instalada en la localidad de San Carlos (Salta). El modelo fue escalado para simular las condiciones operacionales de una central de esta envergadura. Se tomó como referencia el software SAM desarrollado por NREL para comparar los resultados generados con el modelo FAE. Las condiciones climatológicas del lugar sumadas a la ubicación geográfica prácticamente tropical dan factibilidad a la instalación de una central de estas características. En comparación al sitio donde se encuentran instaladas estas plantas (Desierto de Mojave), la central podría entregar potencia eléctrica con una distribución anual más uniforme y generar a potencia nominal durante la mayor parte del año, en días claros.

Palabras clave: grandes centrales solares, modelo analítico, cilindro-parabólico.

INTRODUCCIÓN

Una de las opciones más interesantes para reducir el consumo de combustible fósil y la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂ es la generación de potencia mediante energía solar, siendo una solución efectiva los sistemas de Concentración de Potencia Solar (CSP), Weinstein et al., (2015). Los sistemas CSP representan una tecnología basada en la captura y aprovechamiento de la potencia térmica de la radiación solar mediante el empleo grandes áreas reflectoras para concentrar radiación solar en focos de apertura relativamente pequeña. La finalidad de los sistemas se resume en, por medio del calentamiento de un fluido, alcanzar temperaturas capaces de alimentar un ciclo termodinámico convencional o generar otro fluido de transferencia de calor (*HTF*) a alta temperatura a través de un intercambiador de calor para llevar a cabo el ciclo de generación de electricidad. En general, existen cuatro clases de tecnologías CSP (Mills, 2004): torre central (CT), disco parabólico (PD), cilindro-parabólico (PTC) y Fresnel lineal (LFC).

Dentro de los CSP, el mercado global ha sido actualmente dominado por los sistemas PTC abarcando el 82 % de las plantas solares térmicas a nivel mundial convirtiéndose, así, en el sistema de concentración más popular y con mayor madurez tecnológica (Xu et al., 2016). En el periodo 1984 y 1990, nueve Sistemas Solares de Generación Eléctrica (SEGS, por sus siglas en inglés) han sido construidos en el desierto de Mojave, al sur de California. Las SEGS generan potencia eléctrica mediante la energía térmica colectada desde una serie de colectores concentradores tipo PTC. Esta energía es utilizada en un ciclo Rankine de vapor convencional para producir energía eléctrica. Todas las plantas SEGS continúan operando al día de hoy y, de manera colectiva, generan una potencia pico combinada de 354 MW. Aunque la información abierta relacionada al funcionamiento de estas centrales es escasa, se encuentran algunas referencias bibliográficas basadas en la SEGS VI (Cohen, 1993; Kolb, 1996; Cohen et al. 1999; Price 2002; Patnode, 2006) lo que ha permitido extraer las características constructivas y operacionales de la misma, dando lugar a simulaciones basadas en esta central real.

En términos generales, los campos solares de estas centrales están compuestos por una gran cantidad de filas de colectores de un eje de seguimiento. Los colectores están compuestos por espejos curvados parabólicamente por lo que enfocan la radiación solar incidente sobre un elemento absorbedor de calor (HCE, por sus siglas en inglés) por el que circula un fluido caloportador. La firma LUZ provee los colectores LS-2 y LS-3 empleados en estas centrales, con razones de concentración de 71:1 y 80:1, respectivamente. El HCE es tubo de acero de 70 mm de diámetro cuya superficie posee un tratamiento selectivo con cromo negro o un metal/cerámico (cermet) y se encuentra encerrado por un segundo tubo cilíndrico de vidrio concéntrico al primero donde la región anular entre las superficies se encuentra evacuada (al vacío) para minimizar las pérdidas convectivas hacia el ambiente. La energía concentrada en el HCE es transferida a un fluido caloportador (HTF, por sus siglas en inglés), siendo generalmente éste un aceite sintético resultante de una mezcla de bifenilo y óxido de difenil (Therminol VP-1) el cual es bombeado a través de los tubos del HCE y regresa a alta temperatura al bloque de potencia, donde es utilizado como fuente térmica para la generación de vapor en el ciclo de potencia (mediante un intercambiador de calor). La dependencia del recurso solar hace que las plantas SEGS incluyan calderas para la combustión de gas natural, usadas como suplemento a la producción de vapor solar (hasta un 25 %). Patnode (2006).

Existen diversos modelos, implementados en softwares, que permiten simular centrales solares CSP; la mayoría de ellos son propietarios, por lo que no están disponibles en código abierto restringiendo la posibilidad de una verdadera colaboración para estudiar y avanzar en el diseño de nuevas alternativas dentro del área. Varios autores han orientado sus esfuerzos a la modelación de estas centrales SEGS, Jones et al. (2001) proponen un modelo detallado para la simulación de plantas solares cilindro-parabólicas en el software comercial TRNSYS mediante la implementación de una librería especial "Solar Térmica-Eléctrica" desarrollada por el Laboratorio Nacional de Sandia (EEUU) y el centro de investigación Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V (Alemania). Los autores simularon el funcionamiento de los ciclos térmicos (solares) y de potencia obteniendo errores menores al 10 % en los resultados simulados en comparación a los datos experimentales de la central SEGS VI, en los periodos de operación sólo con energía solar. La desventaja de este modelo es el requerimiento detallado de las entradas e datos para la obtención de resultados precisos, (Price, 2003). Si bien las plantas SEGS tienen permitido, como respaldo, la implementación de una fuente convencional de energía auxiliar (gas natural) hasta un 25 % del aporte térmico anual, es una condición difícil de simular y sólo pocos modelos lo tienen en cuenta.

Otros cuatro modelos para simular plantas solares cilindro-parabólicas son renombrados en la bibliografía, aunque ninguno pertenece al dominio público. El modelo Luz System Performance Model (Kearney y Gilon, 1988) fue implementado en el diseño de las plantas SEGS, aunque presenta menor detalle que otros modelos como SAM y TRNSYS. La compañía KJC, encargada del manejo y operación de 5 de las 9 plantas SEGS, ha mejorado el modelo Luz ya que el mismo es utilizado en la evaluación del desempeño de la planta real. El modelo FLAGSOL (Price et al., 1995) simula las condiciones operacionales de la central para condiciones normales de estado cuasi-constante, el arranque y el apagado diarios y las condiciones climáticas cambiantes durante las predicciones de funcionamiento como potencia eléctrica bruta generada (sólo solar). Aunque FLAGSOL fue desarrollado en base a la experiencia ganada con el modelo Luz, emplea bloques de cálculo menos detallados TRNSYS. Lippke (1995) empleó el programa de simulación EASY para realizar cálculos termodinámicos más detallados para condiciones de carga parcial de la planta SEGS VI (como condiciones para días de invierno y días parcialmente nublados). Este modelo emplea resultados medidos en diferentes test realizados a los colectores LS-2 (Dudley et al., 1994). Lippke comparó los parámetros de salida simulados para diferentes condiciones operacionales de la central real (verano e invierno) con ajustes muy aceptables. El autor también usó este código para evaluar la influencia de los diferentes parámetros, como la temperatura del HTF a la salida del colector, en la salida de potencia bruta y neta (para condiciones de insolación diferentes). Luego, Price (2003) presentó los resultados generados con un nuevo modelo desarrollado esta vez por el NREL (Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EEUU) desarrollado en Microsoft Excel (basado en Visal Basic) que permite la estimación detallada de rendimientos, costos y la evaluación economía para las variantes en diseño y tecnologías de los sistemas PTC. Luego el NREL desarrolló el System Advisor Model (SAM), un software de libre uso, el cuál es capaz de predecir en términos horarios la generación de

energía para diversos sistemas de índole renovable. Esta herramienta es ampliamente utilizada para la planificación y evaluación de programas de investigación, análisis de costos económicos de proyectos y estimaciones de rendimiento, así como para la investigación académica. El software modela las plantas solares térmicas mediante bloques independientes para la carga de datos, pero interconectados para los algoritmos internos de cálculo ejecutados por el programa (campo solar, colector, absorbedor, bloque de potencia, almacenamiento térmico y consumos eléctricos parásitos).

El Grupo FAE de la Universidade Federal de Pernambuco (Brasil) ha desarrollado un modelo analítico, basado en Fraidenraich et al. (1997), de una central solar CCP de 1 MWe (Rolim et al., 2009), el cual permite determinar parámetros asociados a la generación de potencia térmica y eléctrica, para diferentes condiciones de funcionamiento y ubicaciones geográficas de la central a simular. Si bien el modelo fue pensado para simular una central de pequeña escala, se realizaron las adaptaciones requeridas para escalar la simulación a una planta solar de 30 MW con 188000 m² de área de colección. En este sentido, el modelado analítico no solo simplifica la evaluación del rendimiento de las centrales termosolares, sino que también proporciona una imagen física clara de cómo el comportamiento de los elementos y el sistema varían con parámetros clave como las propiedades ópticas y térmicas del colector, las características de la turbina y la incidencia de radiación solar directa. (Salazar et al., 2017).

En este trabajo se estimará la producción de potencia eléctrica bruta y la generación de potencia útil a través del campo solar, usando el Modelo FAE y tomando como caso de estudio geoespacial a la localidad de San Carlos (provincia de Salta). En primera instancia se evalúa el desempeño de la central propuesta en relación a la situación real (datos meteorológicos disponibles para Mercury Desert Rock). Finalmente, los resultados simulados son contrastados contra un modelo de referencia como SAM.

CONSIDERACIONES Y MODELADO

Como se mencionó con anterioridad, se adaptó el modelo FAE desarrollado para una central de 1 MWe para simular condiciones de una gran central solar tipo SEGS VI de 30 MWe (fig.1-izquierda). La planta solar cuenta con un área de colección de 18800 m², compuestos por 16 SCA (*solar collector assembly*) dispuestos en serie y replicados por 50 filas (divididos en capo Este y Oeste, según muestra el *layout* de la fig. 1-derecha).

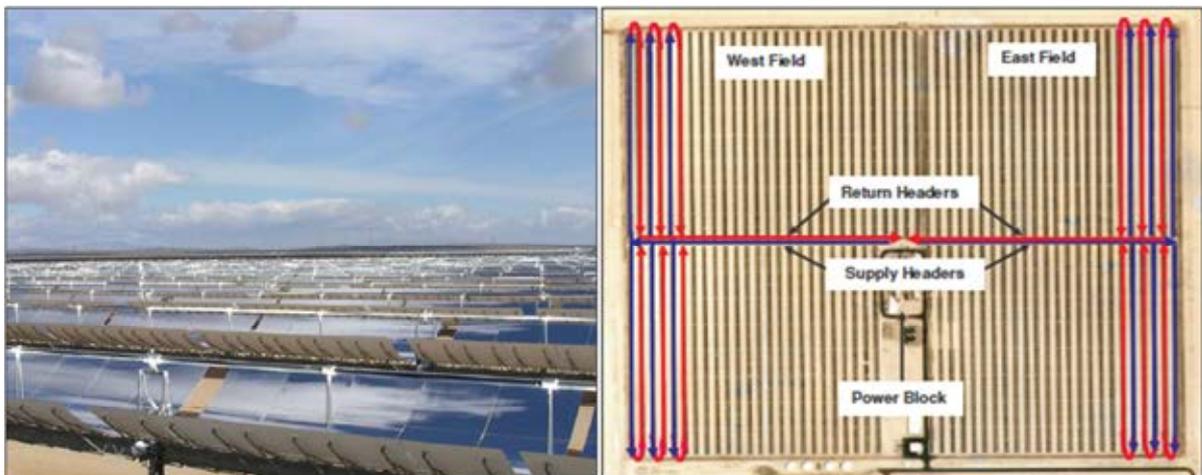


Fig. 1. (Izq.) Colectores cilindro-parabólicos de la central SEGS VI (Kramer Junction, CA). Layout de los colectores solares en SEGS VI, indicando el sentido de circulación del aceite caloportador (Der.). Patnode, (2006).

El modelo FAE está escrito en MathCAD y básicamente se divide en bloques de cálculo interconectados. La secuencia en el algoritmo de cálculo puede observarse de manera simplificada en el diagrama de la figura 2. En primera instancia, los datos geoambientales del lugar deben ser ingresados, incluyendo archivos con un formato especial de Temperatura Ambiente anual (valores horarios) y un archivo con datos de Irradiancia Directa Normal (DNI) para todas las horas del año.

Este último archivo no es obligatorio ya que el algoritmo tiene incluido modelos básicos de estimación de irradiancia global y *DNI*, aun así se recomienda implementar archivos de bases de datos confiables. Además, parámetros asociados a la geometría y características del tipo de colector solar deben ser ingresadas en el bloque del campo solar, incluidos los valores de los coeficientes de pérdida U_0 y U_1 , propuestos por Dudley et al. (1994), según cuál sea la condición del HCE a considerar (evacuado, vacío leve, aire, cermet o cromo negro). Para obtener la potencia útil generada (P_u), el modelo calcula el parámetro $\dot{m}_f C_p$ (flujo másico del fluido por su calor específico) junto con la temperatura media del HTF entre la entrada y la salida del campo colector, llevando a cabo un balance previo entre la potencia absorbida P_a y las pérdidas térmicas hacia el ambiente P_l . Este balance es modelado analíticamente, según Fraidenraich et al. (1997), resolviendo de manera integral las ecuaciones de transferencia de calor para todo el dominio axial del concentrador. Recientemente, se incorporaron bloques de cálculo para los periodos *shutdown* donde la central no genera potencia y las condiciones de operación a carga parcial (Salazar et al., 2017).

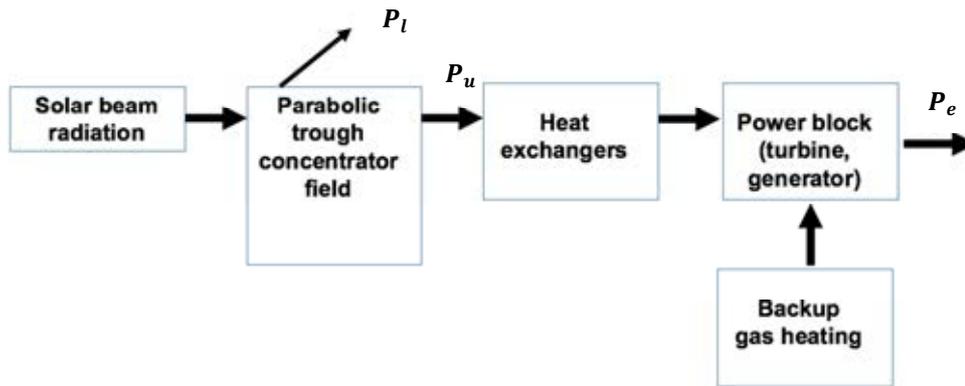


Fig. 2: Diagrama de flujo de energía para una planta solar, la cual genera una potencia eléctrica P_e pudiendo operar en paralelo con una fuente de energía auxiliar (quemador de gas). P_u es la potencia térmica útil y P_l es la tasa de calor perdida hacia el ambiente. Fuente: Salazar et al. (2017).

Características SEGS VI	Valor
Eficiencia óptica del colector a incidencia normal	0,733
Apertura del colector (ancho)	5,0 m
Razón de concentración	22,74 (diámetro externo absorbedor = 70 mm)
Longitud L del colector (SCA)	47.1 m
Número de colectores por fila	16
Número de filas	50
Área total del campo solar	188,000 m ² (LS-2)
Eje de seguimiento	Norte – Sur (horizontal)
Temperatura HTF- entrada colector	308°C
Temperatura HTF- salida colector	391°C
HTF	Therminol VP-1
Potencia nominal/neta turbina	35/30 MWe
Eficiencia conversión turbina (solar)	0,375
Temperatura del vapor en la entrada turbina	373°C
Presión de trabajo en evaporador	10 MPa

Tabla 1: Características de la central de 30 MW a simular (Cohen, 1993).

Para estimar la *potencia eléctrica bruta* generada se implementó, mediante un análisis simplificado, una correlación obtenida mediante regresión lineal (que tiene en cuenta las diferentes etapas en la generación de potencia, incluido el intercambiador de calor) y que fue obtenida por Patnode (2006). Esta correlación, ec. 1, depende del ingreso de: el flujo másico del HTF (\dot{m}_{HTF}), la temperatura T del HTF a la entrada del intercambiador de calor (considerada igual a la temperatura del HTF a la salida de los colectores) y la presión de escape de la turbina P (presión en el condensador).

$$P_e [MW] = a_0 + a_1 \dot{m}_{HTF} + a_2 \dot{m}_{HTF}^2 + a_3 P + a_4 T + a_5 T^2 + a_6 \dot{m}_{HTF} P + a_7 \dot{m}_{HTF} T + a_8 P T \quad (1)$$

Para el siguiente rango de validez:

$$\begin{aligned} 150 &\leq \dot{m}_{HTF} (kg/s) \leq 500 \\ 250 &\leq T (^\circ C) \leq 400 \\ 0,03 &\leq P (bar) \leq 1,5 \end{aligned}$$

Tanto los valores como las desviaciones estándar para los coeficientes a_i de la ec. 1 pueden encontrarse en Patnode, (2006) para una presión de condensación del vapor de 0,08 bar.

La capacidad de generación de la turbina fue acotada en cuanto a máxima y mínima producción, según los requerimientos encontrados en modelos más complejos como SAM. De esta manera la cota superior en generación eléctrica se fijó mediante un factor de 1,15 de la potencia térmica máxima admitida, mientras que la cota inferior con un factor de 0,2. De esta manera, cuando la potencia térmica a la entrada de la turbina es inferior a la cota mínima, el dispositivo no genera potencia eléctrica. La potencia térmica máxima y mínima admisible se fija mediante la eficiencia de conversión característica para esa clase de turbina, como indica la tabla 1. En Rolim et al. (2009) pueden encontrarse más detalles del modelo FAE y sus consideraciones.

Según lo establecido por Jones et al., (2001), las condiciones de operación de la planta SEGS VI cambian de manera poco predecible en el modo de operación con energía auxiliar, quema gas. Además, la lógica utilizada para determinar la cantidad y el momento de la quema de fósiles depende de muchos factores, normalmente es evaluada a consideración de los obreros expertos de la planta, y por lo tanto es difícil de implementar en un modelo de simulación. Así, el modo de operación sólo solar fue considerado en la modelación del problema. Además, sólo se considera un modo de operación sólo solar, *sin generación auxiliar de energía y sin acumulación térmica*.

SAM

Para el contraste contra un modelo de referencia ampliamente utilizado en el ámbito científico, industrial y comercial se utilizó el software *System Advisor Model – SAM (V.29017.9.5)*, desarrollado por NREL. La complejidad en el manejo de esta herramienta computacional disminuye drásticamente cuando se trata de simular una central CSP de tipo comercial, como lo es SEGS VI. Los datos de la tabla 1, además de una serie de datos extra de igual importancia, son seleccionados en los bloques de SAM en concordancia con los datos cargados en FAE. Entre las bases de datos de SAM, se pueden cargar los elementos Luz LS-2 (colector), HCE Luz-Cermet/evacuado (tipo de absorbedor), Therminol VP-1 (HTF), bloque de potencia específico de la central SEGS VI, además de los consumos parásitos propios de esta planta (consumos de energía de sistema de control y movimiento del campo solar, bombas para movimiento del HTF, consumos fijos del bloque de potencia, entre otros). Para ello, fue considerado el método empírico *Empirical Trough*, el cual implementa un sistema de ecuaciones derivadas de análisis de regresión mediante datos medidos de los proyectos SEGS. Éste funciona mejor para sistemas con curvas de rendimiento bien conocidas, o cuando los modelos de subsistemas detallados están disponibles y pueden correlacionarse y convertirse en relaciones simplificadas (Wagner y Gilman, 2011), como se mencionó con anterioridad.

RESULTADOS

Producción mensual San Carlos – Desierto de Mojave

Con el objetivo de comparar las condiciones de operación y producción eléctrica simulada para una central tipo SEGS VI, se contrastaron los resultados mensuales obtenidos para San Carlos (-25,9° de latitud y -65,9° de longitud) y para el desierto de Mojave, mediante los datos meteorológicos registrados por la estación meteorológica Mercury Desert Rock (MDR). Esta última estación corresponde a la clase 1 (datos horarios completos en el periodo 1991-2010) según la National Solar Radiation Database (NSRBD) de los EEUU. MDR (latitud: 36,6° y longitud: -116,0°) es la estación meteorológica, con datos de alta calidad, más cercana a la ubicación real de la central SEGS VI, Kramer Junction (aproximadamente a 170 km de MDR).

Los datos climatológicos se obtuvieron de la base de datos meteorológicos de SAM, para el caso de MDR, y de Meteonorm V.7 para la localidad de San Carlos (SC), siendo estos últimos estimados satelitalmente. El formato de ambos archivos es TMY3 (*Typical Meteorological Year*).

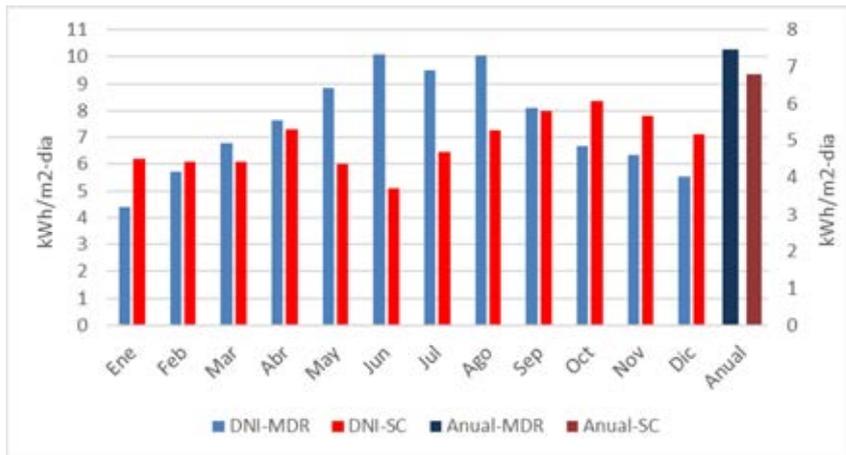


Fig. 3: En eje principal, valores de DNI medios diarios mensuales ($kWh/m^2/día$) para MDR (barras azules) y para SC (barras rojas). En eje secundario, valores de DNI medios diarios anuales.

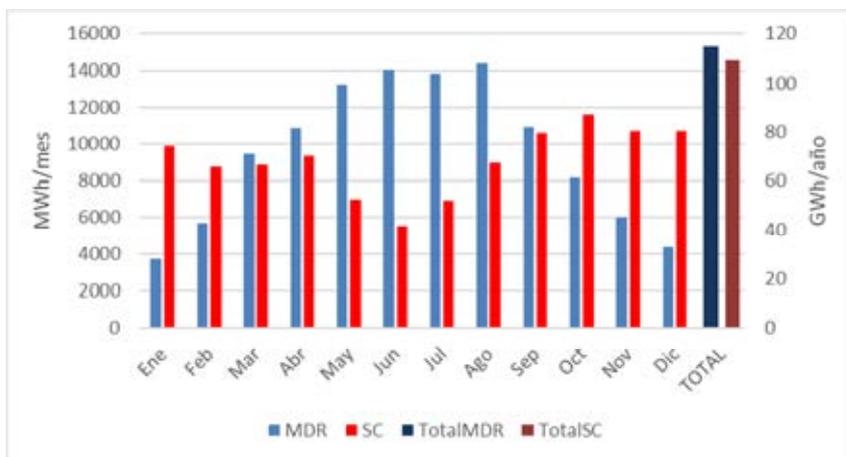


Fig. 4: En eje principal, energía eléctrica bruta mensual generada por la central en MWh/mes. La energía eléctrica bruta producida en términos anuales GWh/año corresponde al eje secundario.

Los datos de DNI en términos medios diarios mensuales para cada localidad se muestran en la fig. 3, donde puede observarse un potencial mayor en cuanto a recurso solar en la localidad desértica de Mojave. Aunque las tendencias están invertidas, por pertenecer a diferentes hemisferios terrestres, los máximos niveles de DNI son observados para MDR en los meses de verano (Junio, Julio y Agosto) con valores diarios de hasta $10 kWh/m^2$. Estos valores se condicen con los máximos de generación de energía eléctrica, de la fig. 4, en promedio 14000 MWh al mes. Para SC, el mes con mayores niveles de DNI fue Octubre (superando levemente los 8 kWh/día) obteniendo la mayor generación mensual de energía cercana a 12000 MWh/mes, una producción de 14 % menos que MDR para los meses de mayor DNI. Analizando los meses de menor producción, SC genera 5500 MWh/mes (Junio) mientras

que MDR podría entregar un 30 % menos de energía, 3800 MWh/mes considerando Enero como el mes más desfavorable. En promedio anual, el recurso solar de MDR supera al de SC, observándose valores de 7,45 kWh y 6,80 kWh por día, respectivamente. Consecuentemente, a lo largo del año, la generación de energía eléctrica para MDR sería de 115 GWh mientras que para SC sería de 109 GWh (5 % menor). Según las distribuciones de los datos mensuales observados en figs. 3-4, es evidente que MDR tiene muy buenas condiciones climatológicas para inversiones en tecnologías CSP, presentando mayor cantidad de días de cielo claro que SC para los meses de alta producción. La latitud menor de SC con respecto a MDR permite una mayor generación de potencia en los meses de menor *DNI* (invierno). Así, una planta en SC operando sólo en modo solar, puede entregar potencia eléctrica de manera más uniforme a lo largo del año, en comparación a MDR.

Simulaciones FAE y SAM

La central solar fue simulada también mediante el software SAM. Esta herramienta (bastante utilizada en el ámbito académico y privado) tiene la ventaja que permite simular centrales solares comerciales sin gran dificultad. La central SEGS VI puede ser simulada mediante la carga de datos básicos asociados al modo de operación y tamaño de la central, el resto de los parámetros de entrada ya se encuentran en la base de datos de SAM (específicos para SEGS VI).

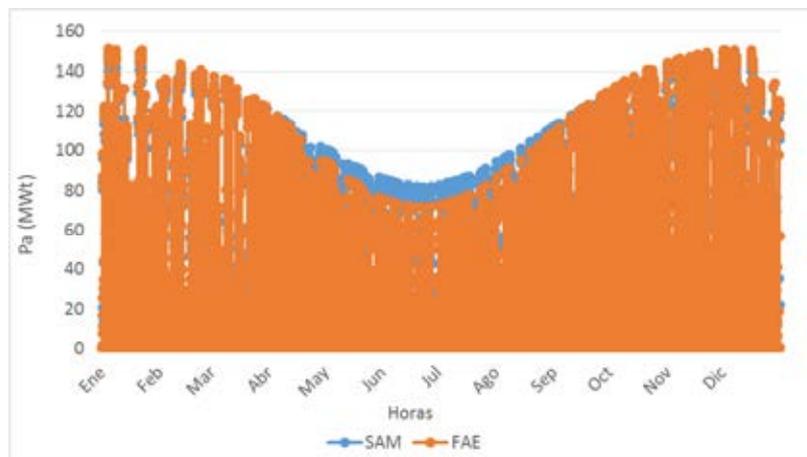


Fig. 5: Potencia absorbida por el HTF en el campo solar, en MWt, para todas las horas del año (SC).

En primer lugar se comparó la potencia absorbida P_a (MWt) debido al aporte energético del campo solar, primera etapa en la secuencia de generación de la central (ver fig.2) simuladas mediante los modelos FAE y SAM. Como puede observarse en fig.5, los valores de P_a obtenidos con ambos modelos son similares, en distribución y magnitud. FAE sobreestima levemente los valores para los meses de verano, mientras que los subestima en invierno, con respecto a los resultados de SAM. En términos generales, FAE subestima en 5 % los valores de P_a . En este primer bloque de cálculo, están incluidas rutinas de cálculo referidas al sistema colector-absorbedor.

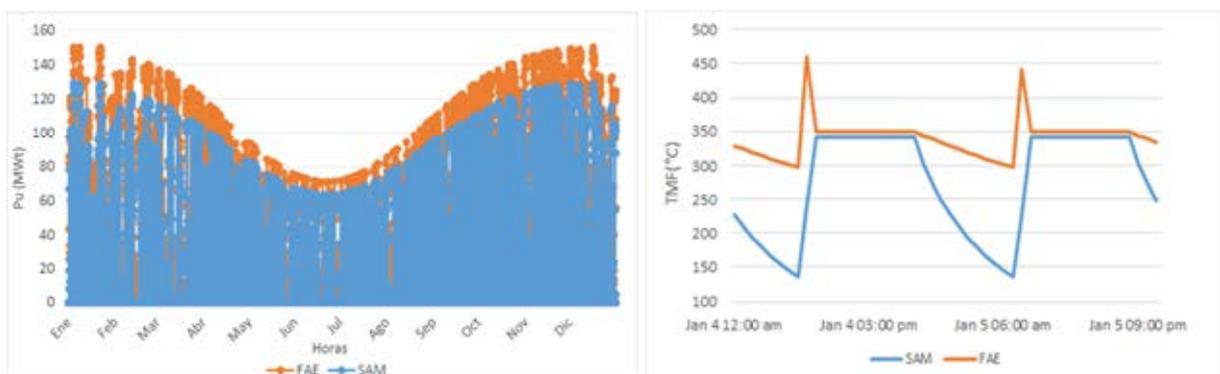


Fig. 6: (Izq.) Potencia térmica útil generada por la central, en MWt, para todas las horas del año (SC). (Der.) Perfil de temperatura media del aceite (TMF) para dos días al azar.

Considerando las pérdidas térmicas desde el absorbedor hacia el ambiente, se define la potencia útil P_u que puede ceder el HTF al vapor de agua en el intercambiador de calor. Como muestra la fig.5 (izquierda), los valores de P_u son sobreestimados por FAE en un 28 % (considerando todo el año) con respecto a los resultados generados con SAM. Como indica la fig. 6 (derecha), existe una diferencia apreciable en la estimación del perfil temporal de temperatura media del fluido (TMF). FAE considera que el HTF se pone en movimiento cuando la temperatura del mismo supera cierto umbral y ejecuta las rutinas de cálculo pertinentes a la central generando potencia. El modelo considera un salto temporal de una hora para los cálculos, esto da lugar a picos en TMF alrededor de 450°C. La subrutina comprueba cada una hora la temperatura del aceite, que en primera instancia se encuentra “quieto” en el sistema y se va calentando acorde a los niveles de DNI (central no operando). Para evitar este efecto, debe considerarse un salto temporal menor a una hora (idealmente 1 minuto). Además, se observan diferentes pendientes en TMF para las horas de enfriamiento (sin disponibilidad de recurso solar), con una tasa de enfriamiento 3 veces mayor para los datos simulados con SAM, que propone estimar las pérdidas térmicas mediante correlaciones más detalladas dependientes de 7 coeficientes constantes de pérdida.

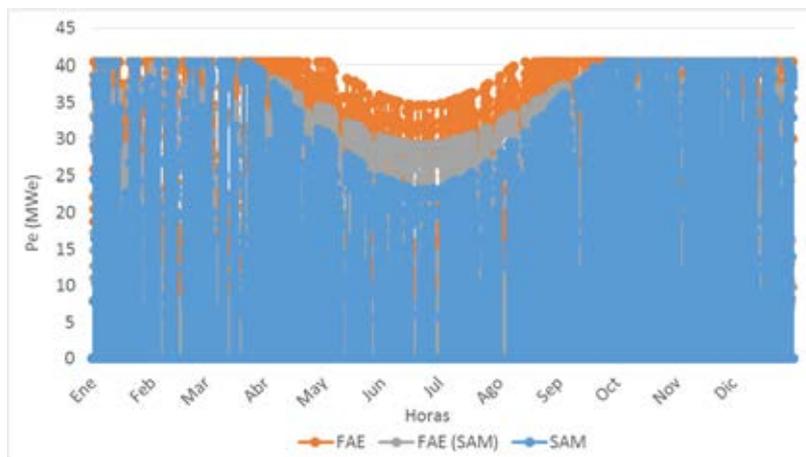


Fig. 7: Potencia eléctrica bruta (MWe) generada por la central, para todos los días del año (SC). Los marcadores grises corresponden a los resultados obtenidos con FAE forzando los valores de \dot{m}_{HTF} obtenidos con SAM.

La potencia eléctrica bruta generada por la central en MWe se muestra en la fig. 7. Acorde a lo observado también en la fig. 6, existe una sobreestimación en los resultados de FAE en los meses de invierno y varios días correspondientes a las estaciones intermedias (otoño-primavera). Los elevados valores de P_u obtenidos con FAE implican una sobreestimación en el flujo másico \dot{m}_{HTF} , parámetro que afecta directamente el cálculo de P_e , según ec. (1). Asimismo, para determinar cuán influyente fue la sobreestimación de \dot{m}_{HTF} se forzaron estos valores en FAE, obtenidos desde SAM y los resultados se muestran con marcadores grises en la fig. 6. En términos anuales, con FAE se estaría sobreestimando en un 50 % la generación de P_e , mientras que forzando los valores de \dot{m}_{HTF} la sobreestimación ronda el 25 %. Para las condiciones de funcionamiento consideradas, existe diferencia en cuanto a las horas de operación de la central: 2525 horas anuales produciendo potencia eléctrica, según SAM, mientras que según FAE son 3480 las horas de producción (sólo solar).

Comportamiento diario de la central para diferentes condiciones ambientales - FAE

Para analizar el comportamiento diario de la central solar térmica ubicada en el lugar de interés (SC) se seleccionaron dos días correspondientes al mes de enero para condiciones de cielo diferentes: primero, totalmente claro y luego, parcialmente cubierto (soleado en horas de la mañana y cubierto en horas de la tarde).

De la fig. 8 (izquierda) puede observarse la variación en el perfil de TMF (eje principal) para un día de cielo claro como lo refleja la distribución de DNI (eje secundario) a lo largo del día. En la primera hora con insolación (8 am - 648 W/m²) el fluido sin movimiento en el absorbedor es calentado por encima de los 400 °C. A las horas 9 am, al cumplirse la condición para el “arranque” del sistema

($TMF > 310\text{ }^{\circ}\text{C}$), se acciona el movimiento del fluido a una tasa \dot{m}_{HTF} tal que las condiciones de temperaturas a la entrada y salida del campo solar ($310\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $390\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente) se mantengan fijas durante esa hora. Como se mencionó con anterioridad, un paso temporal más pequeño evita la aparición del pico en TMF . La variación en la generación de potencia P_u y P_e para el mismo día se muestra en fig. 8 (derecha), estas distribuciones son acordes a la variación de la DNI a lo largo del día (como era de esperarse). Para este día, la producción de la turbina es la nominal (máxima) para todas las horas de operación (9 am - 7 pm), excepto a las 8 pm (producción eléctrica bruta de 37 MWe). La eficiencia en la conversión de P_u a P_e es de 37 %.

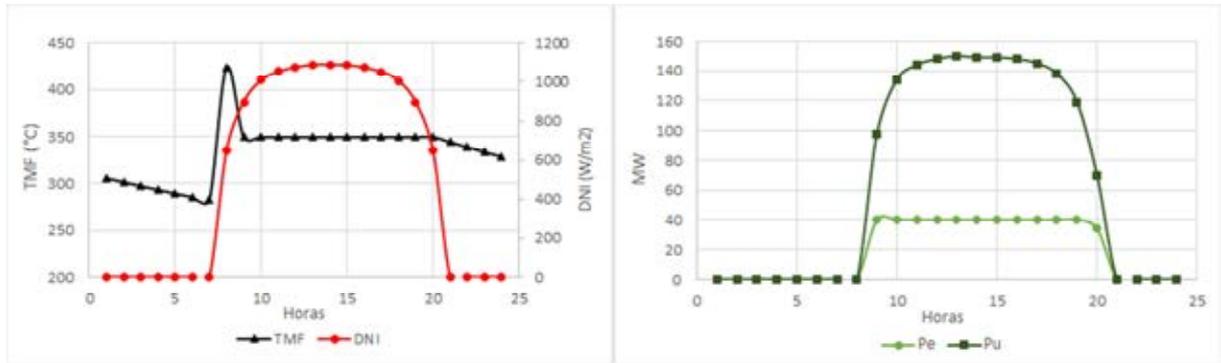


Fig. 8: (Izq.) Variación diaria de TMF (eje principal) en contraste con DNI (eje secundario). Generación de P_u y P_e a lo largo de un día (Der.). El día corresponde al 8 de enero (condiciones de cielo claro).

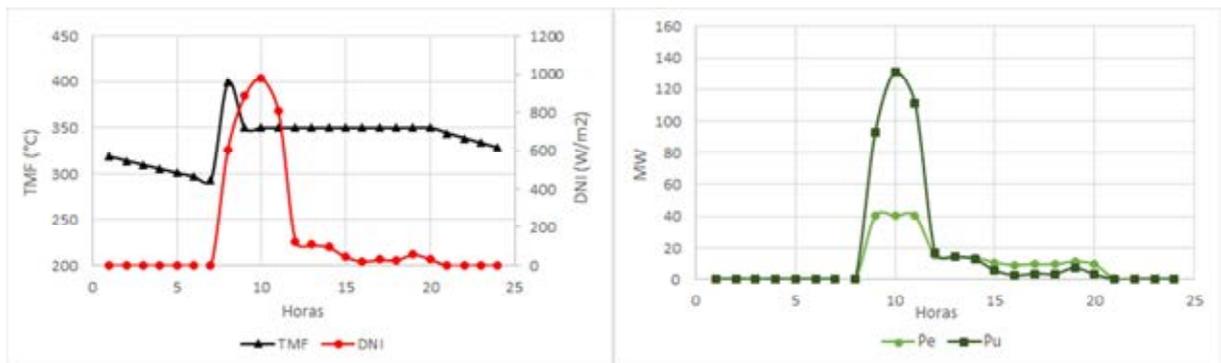


Fig. 9: (Izq.) Variación diaria de TMF (eje principal) en contraste con DNI (eje secundario). Generación de P_u y P_e para un día del año (Der.). El día corresponde al 13 de enero (condiciones de cielo cubierto).

Por otro lado, la fig. 9 muestra la situación para un día claro por la mañana (hasta horas 10 am) y nublado desde las horas 11 am, por lo que los valores de DNI caen drásticamente desde esta hora (fig. 9, izquierda). Puede observarse que el requerimiento energético para el fluido se cumple entre las horas 7 y 8 am. A partir de las 12 pm, a pesar de los bajos valores de DNI (menores a 150 W/m^2), la central continuaría operando y manteniendo las condiciones de temperatura del fluido a costa de bajar el caudal de circulación del mismo de manera abrupta. De hecho, la fig. 9 (derecha) muestra inconsistencias en las distribuciones de P_u y P_e (entre las horas 3 y 8 pm, donde $P_e > P_u$). Estos resultados reflejan el requerimiento de incorporar un rango de valores de operación para \dot{m}_{HTF} , como lo considera SAM.

Finalmente, la fig. 10 muestra la generación de energía eléctrica bruta (sin considerar los consumos eléctricos internos de la central). Estos valores presentan una distribución acorde a la estación del año, con la máxima producción en verano 480 MWh/día para días claros. Luego para los días de primavera y otoño, la máxima producción eléctrica es cercana a 420 MWh/día , mientras que la central generaría menos energía eléctrica en los días de invierno con máximos entre 250 y 300 MWh para días claros. La dispersión de los datos se debe a la presencia de los días de cielo parcial o totalmente nublados. Como se mencionó en apartados anteriores, la latitud cercana al trópico de SC permite una

distribución anual más uniforme en la producción de energía (sólo solar) que otros lugares donde se encuentran instaladas las centrales, como el Desierto de Mojave.

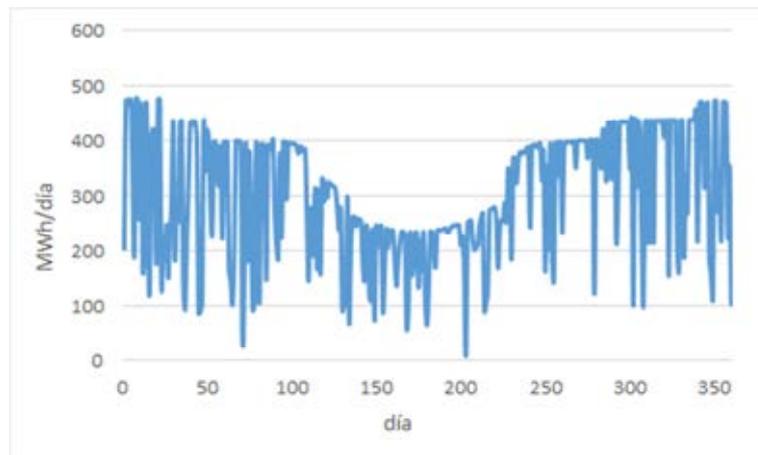


Fig. 10: Energía eléctrica bruta diaria generada por la central SEGS VI en SC.

CONCLUSIONES

Se modelaron las condiciones de operación referidas a una central solar térmica real como la SEGS VI (Kramer Junction, CA). Se tomó como caso de análisis la localidad de San Carlos (Salta) para simular el funcionamiento de una central de 30 MW bajo las condiciones meteorológicas del lugar, mediante el modelo FAE. Debido a que el modelo fue pensado para simular centrales de pequeña escala (1 MWe), la simulación de grandes centrales requiere el abordaje de algunos bloques de cálculo con mayor detalle, como ser el bloque de potencia y las consideraciones para determinar las pérdidas térmicas en el absorbedor para el modo de operación *shutdown*, además de una mayor resolución en la grilla temporal en las rutinas de cálculo. Comparado a una herramienta de simulación referente como SAM (el cual requiere una cantidad considerable de datos de entrada), el modelo FAE sobreestima la generación de potencia térmica y eléctrica en los meses de invierno hasta un 50 % de lo estimado por SAM. Esto se asocia, también, a que SAM considera el 74 % de las horas de operación (con la central generando) que considera FAE por lo que debe implementarse un rango de operación para los valores de flujo másico de fluido caloportador (mínimo y máximo). Manteniendo la simplicidad del modelo FAE, se tendrán en cuenta estas observaciones a fin de mejorar las predicciones realizadas con el modelo.

En cuanto al potencial del lugar, es factible la instalación de un sistema de esta envergadura. En comparación al Desierto de Mojave, si bien la producción anual sería aproximadamente 14 % menor en San Carlos, la generación eléctrica sería más uniforme a lo largo del año por lo que la potencia eléctrica presenta menor amplitud entre los valores de verano e invierno en comparación a la región donde se encuentran instaladas las plantas SEGS. Estas condiciones presentan ventajas referidas a la inyección de energía eléctrica a la red, si se considerará sólo la operación solar de la central, con una generación mejor distribuida en el año.

REFERENCIAS

- Cohen G., (1993). Operation and efficiency of large-scale solar thermal power plants. Proc. SPIE 2017, Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XII, (22 October 1993).
- Cohen G., Kearney D., Kolb, G., (1999). Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for CSP Plants. Report No. SAND99-1290, Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM.

- Dudley V. E., Kolb G. J., Mahoney, A. R., (1994). Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector. Report No. SAND94-1884, SNL, Albuquerque, NM.
- Jones S., Blair N., Pitz Pal R. y Cable R. TRNSYS modeling of the SEGS VI parabolic trough solar electric generating system. Proceedings of Solar Forum 2001: Solar Energy: The Power to Choose, April 21-25, 2001, Washington DC.
- Kearney D. y Gilon Y., (1988). Design and Operation of the Luz Parabolic Trough Solar Electric Plants. VDI Berichte NR. 704, Cologne, Germany.
- Kolb G.J., (1996). Evaluation of power production from the solar electric generating systems at Kramer Junction: 1988 to 1993. ASME Int. Solar Energy Conf., Lahaina, HI, 19-24 March 1995.
- Lippke F., (1995). Simulation of the Part-Load Behavior of a 30 MWe SEGS Plant. SAND95-1293, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Patnode A.M., (2006). Simulation and performance evaluation of parabolic trough solar power plants. MSc Thesis. Mechanical Engineering Department, University of Wisconsin-Madison.
- Price H. (2003). A parabolic trough solar power plant simulation model. In: Proc. ASME 2003 International solar energy Conference. Paper No. ISEC2003-44241. Pp. 665-673. Kohala Coast, HI; 2003.
- Price H.W., Svoboda P., Kearney D., (1995). Validation of the FLAGSOL Parabolic Trough Solar Power Plant Performance Mode. Solar Engineering 1995, American Society of Mechanical, Maui, Hawaii.
- Reporte Técnico 7239115B, Therminol® VP-1, vapor phase/liquid phase heat transfer fluid, 12°C to 400°C. St. Louis, MO: Solutia Inc.; 1999
- Rolim M., Fraidenraich N., Tiba C., (2009). Analytic modeling of a solar power plant with parabolic linear collectors. Solar Energy 83, pp. 126-133.
- Salazar G.A., Fraidenraich N., Alves de Oliveira C.A., Castro Vilela O., Hongn M., Gordon J., (2017) Analytic modeling of parabolic trough solar thermal power plants. Energy 138(1), pp 1148-1156.
- Wagner M. y Gilman P., (2011). Technical Manual for the SAM Physical Trough Model. 124 pp.; NREL Report No. TP-5500-51825.
- Weinstein L.A., Loomis J., Bhatia B., Bierman D. M., Wang E.N., Chen G., (2015). Concentrating solar power. Chem. Rev. 115 12797e12838.
- Xu Xinhai, Vignarooban K., Xu Ben., Hsu K., Kannan A.M., (2016). Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions. Renewables and Sustainable Energy Reviews 53, 1106-1131.

ABSTRACT

In this work, the production of thermal and electric energy of a parabolic trough solar plant was estimated through an analytic model, here called as FAE. The conditions refer to SEGS VI – 30 MWe (Kramer Junction) were taken to carry out the simulations. A solar thermal plant located in San Carlos (Salta) was considered as the study case. The model was modified to simulate the operational conditions of a large scale power plant, it was development for parabolic trough systems of 1 MWe. The model SAM (development by NREL) was taken as a reference to compare the results from FAE. The climatological conditions and the geographic location of San Carlos make it interesting to install a solar plant with these characteristics. In comparison to the site where SEGS are installed (Mojave Desert), the plant could deliver electrical power with a more uniform annual distribution and generate nominal power during most of the year, on clear days.

Keywords: power plant, model, solar parabolic trough, Salta, Direct normal

MODELADO DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN BIODIGESTOR, CALEFACCIONADO CON ENERGÍA SOLAR, MEDIANTE EL SOFTWARE SIMUSOL

J.N. Martín^{1,1}, G. Barea^{2,1}, S. Manrique^{3,2}, A. Esteves^{4,1}

1. Instituto de Ambiente Hábitat y Energía (INAHE), Centro Científico Tecnológico Mendoza CCT - Mendoza. Av. Ruiz Leal s/n Parque General San Martín. Mendoza - Argentina. CP 5500. Tel: 54-261-5244338 / Fax: 54-261-5244001 Correo electrónico: jnmartin@mendoza-conicet.gov.ar

2. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Av. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina. +5493874255424.

Recibido 14/08/18, aceptado 28/09/18

RESUMEN: Se desarrolló un modelo térmico con el software SIMUSOL para un prototipo de biodigestor anaerobio, previamente construido. El biodigestor se calefacciona de forma pasiva con energía solar, y se busca lograr el mantenimiento de las condiciones térmicas a través de aislamiento. El modelo computacional propuesto representa los flujos de calor existentes entre los principales elementos de la envolvente del prototipo de biodigestor y el ambiente. Para su ajuste y validación, se realizó un ensayo de 150 horas de mediciones experimentales, registrando como datos de entrada: temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento; además de las temperaturas en 17 puntos del prototipo. El modelo fue revisado en función de los resultados experimentales obtenidos, controlando la diferencia entre valores simulados y medidos. Se obtuvo un buen ajuste entre ambas series de datos, logrando modelar satisfactoriamente el comportamiento térmico del digestor y disponer de una herramienta de mejora del diseño.

Palabras clave: Biodigestor, Energía Solar, Simulación térmica, SIMUSOL

INTRODUCCIÓN

En ámbitos rurales del Centro-Oeste de Argentina habitan comunidades energéticamente aisladas, y con dificultades para proveerse de un recurso energético estable. Estas zonas se caracterizan por ser frágiles desde el punto de vista ecosistémico, tanto por los climas reinantes como por el impacto que el ser humano produce en su necesidad de proveerse de los recursos de subsistencia mínimos. Algunos pobladores hacen uso de las tierras áridas para la cría de ganado, principalmente caprino.

La digestión anaerobia (o biodigestión) de guano es una tecnología promisoría que provee una fuente de energía limpia (biogás) y un fertilizante enriquecido, además de mejorar la sanidad ambiental. Estos beneficios hacen a la digestión anaerobia, una fuente de energía particularmente factible para áreas rurales remotas (Preston y Rodríguez, 2002; Velo, 2006).

El proceso de biodigestión, si bien puede realizarse en diferentes rangos de temperatura, opera con mayor velocidad y eficiencia a temperaturas elevadas, siendo óptimo a temperaturas de 35 °C y acelerándose las reacciones por encima de este valor. En climas fríos y en grandes altitudes, no se reúnen estas condiciones (Weatherford y Zhai, 2015). El diseño del biodigestor debe adaptarse a esas condiciones no ideales. Esta situación ocurre en toda la zona Centro-Oeste de Argentina, cuyas temperaturas disminuyen marcadamente en el invierno y muestran una gran amplitud térmica.

1 Becario doctoral CONICET

2 Investigador Asistente CONICET

3 Investigadora Asistente CONICET

4 Investigador Independiente CONICET

En el marco de las investigaciones del grupo de Energía Renovable en Arquitectura Construcción y Equipamiento, del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), CONICET, se desarrolló un modelo de biodigestor anaerobio con calefacción solar (Orduna et al., 2007). La producción del mismo resultó insuficiente, por lo que, apoyados con una beca doctoral financiada por CONICET, se retomó la investigación. Se desarrolló un nuevo prototipo y siendo que el comportamiento térmico resultaba el punto central de este diseño, se desarrolló un modelo térmico computacional, que permitiera simular el comportamiento del mismo frente a las variaciones de factores del clima, y poder realizar los ajustes técnicos para su óptimo rendimiento.

En este proceso, Hreiz et al. (2017) indican que: “*la simulación constituye una herramienta predictiva poderosa para asistir y dar soporte a ingenieros para conducir estudios costo-eficiencia de digestores anaeróbicos y determinar el diseño y condiciones operativas óptimas: (1) determinando los requerimientos de calor (...), (4) las simulaciones permiten determinar qué fenómenos conducen a las mayores pérdidas de calor y probar la eficiencia de soluciones técnicas potenciales para limitar estas pérdidas y mejorar el balance de energía del digestor, (...)*”.

Existen múltiples trabajos que presentan modelos térmicos de biodigestores para zonas frías. Weatherford y Zhai (2015) revisan modelos existentes para digestores de tipo bolsa en zonas frías. Axaopoulos et al. (2001) simulan, mediante el software TRNSYS, un digestor enterrado de 45 m³ usando datos climáticos experimentales, temperatura ambiente, irradiancia total sobre superficie horizontal y velocidad de viento.

En este trabajo, se utiliza el software SIMUSOL para realizar este modelo, contando ya con múltiples aplicaciones que demostraron su potencialidad. Quiroga et al. (2006) y Suárez (2012) realizan y ajustan un modelo de invernadero para cultivo de vegetales en Salta. González et al. (2014) modelan un colector solar de aire y ajustan el modelo con datos experimentales.

Los resultados del modelado térmico se contrastan con datos recabados a nivel experimental con la puesta en marcha del digestor. Dicho modelo, se utilizará para simular el comportamiento del sistema frente a la variación en el registro de los datos de entrada, principalmente, al variar las condiciones climáticas. Se pretende además alentar la aplicación del software SIMUSOL para el ámbito de la biodigestión, que aún cuenta con escasos reportes.

METODOLOGÍA

Descripción del prototipo de digestor anaerobio

Dentro del Área experimental de INAHE, en el Centro Científico Tecnológico (CCT) Mendoza (32,89° S; 68,87° O), se instaló un prototipo de biodigestor (ver Figura 1) a una altitud de 830 m.s.n.m. El digestor es de tipo tubular o de bolsa, construido en polietileno de 200 micrómetros, con un volumen útil de 0,25 m³. El prototipo, diseñado para trabajar semi-enterrado en zonas frías, se encuentra montado sobre una plataforma en altura para facilitar su operación e introducción de mejoras. Dispone de aislación térmica en todo su envolvente. La cubierta está constituida por un film de polietileno translúcido de 200 micrómetros de espesor con inclinación de 144° respecto a la horizontal. La cubierta aislada móvil dispone en su cara interior de papel metalizado reflectante y EPS de 2 cm, con una inclinación de 60° respecto a la horizontal. Se indica con puntos rojos la ubicación aproximada de los sensores de temperatura en el corte transversal. El prototipo dispone de dos sets de sensores como los indicados.

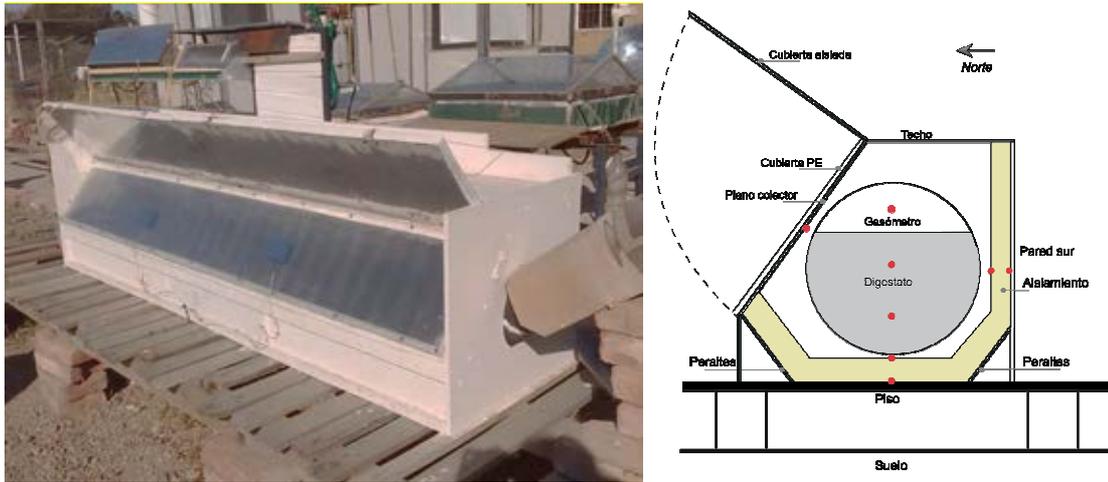


Figura 1. Prototipo en ensayo. Vista anterior y croquis detallando principales partes del mismo.

Descripción del modelo térmico

Se propone un modelo de 1 dimensión “1-D” para simular la variación de temperatura de la biomasa que se está descomponiendo anaeróbicamente, en función de las condiciones climáticas experimentadas en la ciudad de Mendoza (ver Figura 2). Se consideran intercambios de calor por radiación, convección y conducción, además de ganancia de calor a través de un plano colector expuesto a la radiación solar. Se representan con módulos resistivos, flujos de calor y fuentes de temperatura, los intercambios de calor presentes en el prototipo y su interacción con el ambiente.

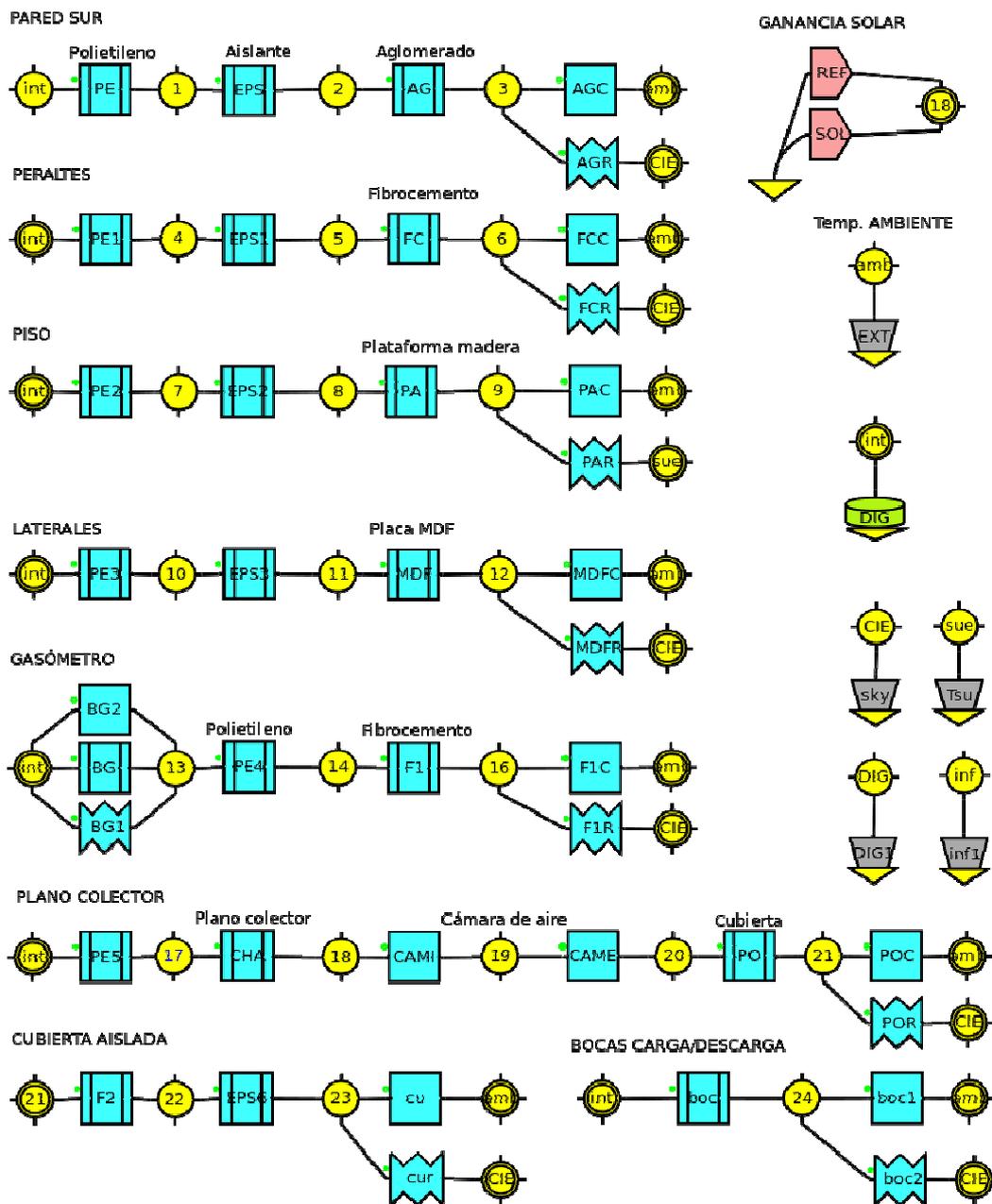


Figura 2. Diagrama DIA utilizado para la simulación con SIMUSOL

a) Intercambios de calor

El modelo representa el comportamiento térmico del prototipo a través de los fenómenos de: a) conducción: a través de muros, piso, techo del gasómetro y plano colector; b) convección: desde superficies exteriores de muros, piso, techo, plano colector al ambiente y en la cámara de aire del plano colector; c) radiación: desde superficies exteriores de muros, piso, techo y plano colector; d) radiación entre la superficie libre del digestato y la cubierta del gasómetro; e) ganancia solar directa y reflejada a través de plano colector.

Los supuestos asumidos por el modelo son:

- ✓ cada elemento es representado por una sola temperatura 1-D. Se desestima la estratificación en los fluidos y gradiente térmico en sólidos,
- ✓ no se considera efecto de acumulación de energía en los materiales, envoltorio de polietileno, aislantes térmicos de muros, techo y piso ni en el biogás presente en el gasómetro,

- ✓ el gasómetro es simulado como un prisma rectangular, con su altura determinando el volumen del gasómetro totalmente inflado,
- ✓ se descartan intercambios radiativos entre superficies internas por ser un equipo prácticamente compacto sin espacios abiertos interiores, con excepción del intercambio radiativo entre la superficie del digestato y la superficie interior del gasómetro,
- ✓ el intercambio radiativo de la superficie externa del piso hacia el ambiente es con el suelo, a una temperatura igual a la media mensual para el mes de junio, de 7,9 °C,
- ✓ se descarta generación de calor por microorganismos, y pérdida de calor por evaporación adentro del digestor y en el gas,
- ✓ al ser un proceso en batch no se consideran intercambios de calor por transferencia de masa en la carga y descarga,
- ✓ no se considera pérdida o ganancia de energía por ventilación, infiltración de aire por ser un sistema herméticamente cerrado,
- ✓ se asume que el digestor no afecta la temperatura de la atmósfera, pero ésta si afecta la temperatura del digestor,
- ✓ se asume que el digestato tiene una capacidad calorífica similar al agua (Hreiz et al., 2017; Perrigault et al., 2012), dado que el digestato tiene solo un 8,9 % ST.

Varios autores modelan estos sistemas térmicos asumiendo una temperatura homogénea del digestato en todo su volumen, al igual que en este trabajo. Considerando la heterogeneidad térmica, se requeriría de dinámica de fluidos computacional (CFD), pero es muy compleja en digestión anaerobia por existir una superficie libre, con burbujas de biogás, sólidos suspendidos y un carácter marcadamente no-Newtoniano del digestato (Hreiz et al., 2017).

Dado que la zona del techo de gasómetro no está aislada, se incorpora el intercambio radiativo entre la superficie libre del digestato y la superficie interior de la cubierta del gasómetro, para evaluar su magnitud; considerando valores experimentales preliminares obtenidos, y que estas pérdidas han probado ser considerables por otros autores (Hreiz et al., 2017).

Los intercambios radiativos de las superficies exteriores con el ambiente se implementan usando una temperatura de cielo T_{sky} (Ecuación 1), donde T_{At} es la temperatura ambiente expresada en K (Swinbank, 1963).

$$T_{sky} = 0,0552T_{At}^{1,5} \quad (1)$$

b) Parámetros usados en el modelo

Para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor (ver Tabla 1) se sigue la metodología propuesta por Perrigault et al. (2012) e Incropera et al. (2011).

Elemento	Conductividad Térmica [W/m°C]	Fuente
<i>Aislante EPS</i> ¹	0,035	IRAM11601:2002
<i>MDF 13 mm “particle board high density”</i>	0,17	
<i>Aglomerado 15 mm “particle board low density”</i>	0,078	
<i>Placa Fibrocemento “Asbestos–cement board”</i>	0,58	(Incropera et al., 2011)
<i>Chapa galvanizada</i> ²	118	
<i>Madera de soporte de piso Eucaliptus</i>	0,12	
<i>Polietileno de cubierta 200 microm</i>	0,43	DIN52612
<i>Biogás</i>	0,025	(Perrigault et al. (2012))

Coeficientes Convectivos [W/m ² °C]		
<i>Exterior vertical muro Sur y laterales</i>	13,36	A partir de Perrigault et al. (2012)
<i>Exterior oblicuo Cubierta</i>	28,78	
<i>Exterior horizontal piso</i>	19,60	
<i>Exterior horizontal techo</i>	23,74	
<i>Interior gasómetro</i>	1,51	
<i>Interior cámara de aire plano colector/cubierta</i>	1,28	

Emisividad		
<i>Superficie interna gasómetro</i>	0,90	(Hreiz et al., 2017)
<i>Digestato en contacto con biogás</i>	0,90	
<i>Superficies exteriores, muros, techo, piso y plano colector</i>	0,95	Anónimo

1: Expanded Polystyrene / Poliestireno expandido: espesor 5 cm, 20 kg/m³.

2: *Chapa* Sinusoidal (Acero + Zinc) pintada negro mate, asumido como puro Zn.

Tabla 1. Parámetros térmicos usados en el modelo

El cálculo de los coeficientes convectivos se realizó en una planilla de cálculos externa al software SIMUSOL. Estos coeficientes estáticos no consideran por ejemplo, las variaciones de temperatura existentes en la realidad. Saravia y Alía de Saravia (2014) proponen una metodología superadora que incorpora el cálculo de los coeficientes convectivos dentro del mismo software. Otros parámetros utilizados se detallan en la Tabla 2.

Elemento	Valor	Fuente
<i>Transmitancia visible polietileno de la cubierta</i>	65 %	(Perrigault et al., 2012)
<i>Masa de digestato</i>	234 kg	Medición propia
<i>Capacidad calorífica digestato</i>	4180 [J/kg*K]	(Hreiz et al., 2017; Perrigault et al., 2012)
<i>Área total envolvente</i>	2,96 m ²	Medición propia
<i>Área de ganancia solar</i>	0,48 m ² (16,2% del total)	Medición propia

Tabla 2. Otros parámetros considerados en el modelo

Ensayo experimental del dispositivo y adquisición de datos

Se realizó un ensayo consistente en 150 horas de mediciones experimentales. Este tiempo corresponde al periodo entre las 00:00 hs del día 20/06/2018 hasta las 23:00 hs del día 25/06/2018.

El prototipo de digestor se utilizó con una carga consistente de mezcla de agua y guano caprino en una proporción de 8,9 % de Sólidos Totales (ST). Si bien su diseño permite carga semi-continua de material, en esta etapa se operó en forma discontinua o batch.

Se le asignó al único elemento másico, el digestato, una temperatura inicial de 17,2 °C. Durante el día (entre las 9:30 y las 16:30), con cielo despejado, se simula con radiación solar incidiendo sobre el plano colector (cubierta aislada abierta). Al atardecer (desde las 16:30), la cubierta cierra el plano colector disminuyendo pérdidas. Este comportamiento se modeló usando una resistencia conductiva durante las horas sin radiación solar, igual al EPS 0,035 W/m°C. En la Figura 2, se puede observar las dos vías de simulación en el nodo 21.

Un dato indispensable para el cálculo solicitado por Simusol, es la radiación global sobre el plano inclinado del colector solar. Dichos valores se calcularon por medio del software Energy Plus usando de base los datos de irradiancia de la estación de INAHE. En primer lugar se armó un archivo de clima en formato *.epw con datos de radiación global sobre plano horizontal. Por medio de Legacy Openstudio se dibujó el plano con la misma inclinación del colector. Se corrió la simulación con el dato de salida requerido con frecuencia horaria (OutputVariable: Surface Outside face Incident solar radiation ratio per área).

Se realizó el seguimiento de las variables climáticas (velocidad del viento, temperatura ambiental e irradiancia global en un plano horizontal) y de comportamiento térmico del prototipo (temperatura) durante 6 días consecutivos, en el inicio de la temporada invernal. Según el Servicio Meteorológico Nacional, el mes de junio se caracteriza por una mínima media de 4 °C y máxima media de 15 °C.

Los datos climáticos locales (ver Figura 3) se obtuvieron de la estación meteorológica del CCT Mendoza y de la estación de medición de irradiancia e iluminancia de INAHE (INAHE, s/f). De la primera se utilizaron los valores medios diarios de velocidad de viento [m/s] y de la segunda los valores de irradiancia global en plano horizontal [W/m²]. Estos datos se obtuvieron con un piranómetro Eppley 8-48, con un datalogger Webdaq100 registrando minuto a minuto datos de irradiancia e iluminancia global y difusa. El dato horario de radiación se obtuvo por promedio de los 60 datos registrados y la velocidad de viento, considerada en el cálculo de coeficientes convectivos, y fue el promedio de todo el periodo.

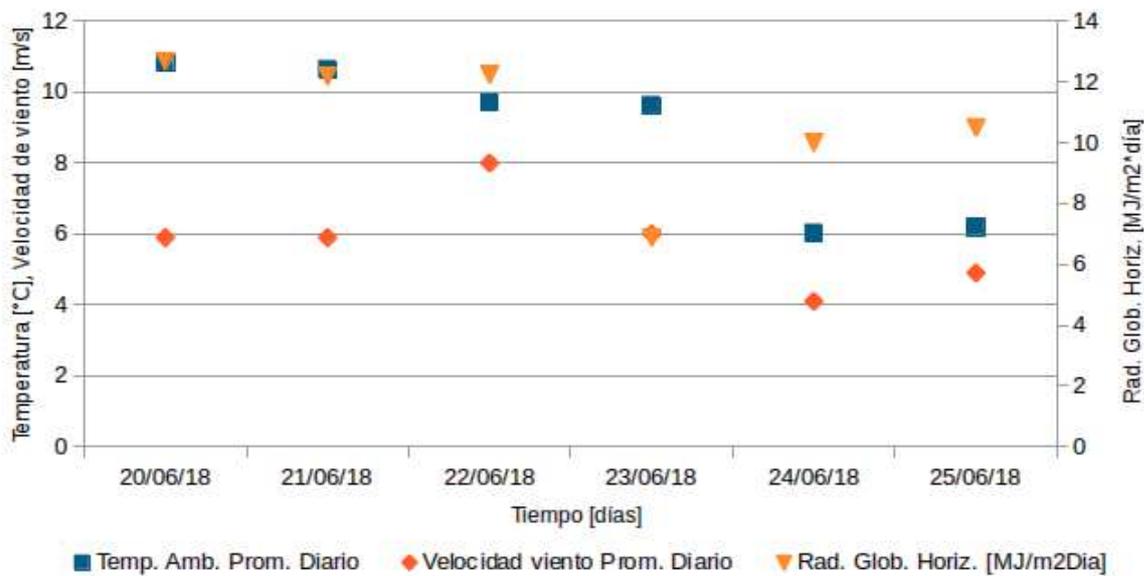


Figura 3. Datos climáticos promedio diario durante período de ensayo

Las mediciones de temperatura del prototipo se realizaron con 17 sensores digitales DS18B20 y un datalogger, fabricado por quienes suscriben, basado en microcontroladores Arduino. Varios autores han utilizado este tipo de esquemas de medición y adquisición de datos entre los que se destacan Bohórquez et al. (2009) por presentar el mismo como una metodología replicable. Las temperaturas monitoreadas en el prototipo cada 15 minutos se promediaron en base horaria.

El sensor utilizado se presenta con un encapsulado TO-92 y envainado plástico. El error es, según dato del fabricante, de $\pm 0,5$ °C entre - 10 °C y + 85 °C, para el resto del rango es de ± 2 °C. La resolución del sensor es programable desde 9 a 12 Bits. En los ensayos se programó en 10 Bits.

Se introdujeron pequeñas modificaciones en el modelo propuesto, observando la mejora en el ajuste con respecto a los datos experimentales, como por ejemplo: el espesor del aislamiento, la cantidad de masa térmica del digestato, la cantidad de la energía reflejada por el reflector que es absorbida por el plano colector (JREF); y asumiendo que el rendimiento del colector es del 50 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajustes y validación del modelo

La Figura 4 muestra con detalle las temperaturas del digestato registradas en la experiencia (TEMP DIG) y las obtenidas por la simulación (TEMP int).

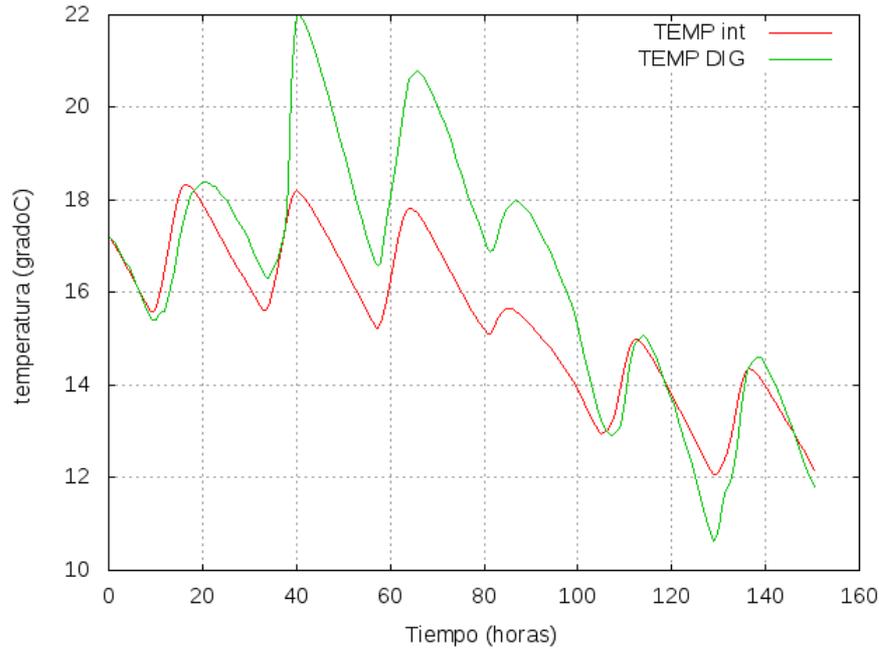


Figura 4. Temperaturas del digestato medidas y simuladas. Donde: TEMP int = Temperatura simulada; TEMP DIG= temperatura medida.

Considerando los datos horarios de temperatura promedio de los cuatro sensores del digestato, en comparación con los datos de simulación para todo el periodo, la diferencia entre los valores es de 1,36 °C que equivale un 8,44 % de la temperatura media del digestato (ver Figura 4).

Perrigault et al. (2012) obtienen un error típico de 0,47 °C correspondiendo a un 2 % de error respecto a la misma temperatura. Hassanein et al. (2015) obtienen un acuerdo entre los datos simulados y datos validados, con una diferencia de 0,34 °C o 3,3 % de diferencia. Por último Jayashankar et al. (1989) obtienen una diferencia de $\pm 2,6$ °C mientras que Fleming (2002) obtiene un 5,7 % de diferencia.

Se evalúa estadísticamente el comportamiento del modelo basado en el primero, quinto y sexto día, a través del Test no paramétrico de Kruskal Wallis. Los días restantes no se toman en cuenta por presentar un comportamiento poco usual, dado por la variabilidad climática real no aplicable a un modelo computacional de este tipo. Se encuentra que entre las series de datos de temperatura del digestato medida y simulada no hay una diferencia significativa, con $H = 0,002$ y $p = 0,963$.

En la Figura 5 se presentan los flujos de calor entre la masa del digestato y el ambiente a través de las distintas capas: polietileno, aislante y material de envolvente. El valor positivo de los flujos indica pérdida de calor hacia el ambiente. La pérdida de calor a través del gasómetro (RPE4) es la más significativa, representando aproximadamente un 60 % del total, por ser el elemento a mayor temperatura de todo el sistema y no estar aislado del ambiente en este ensayo.

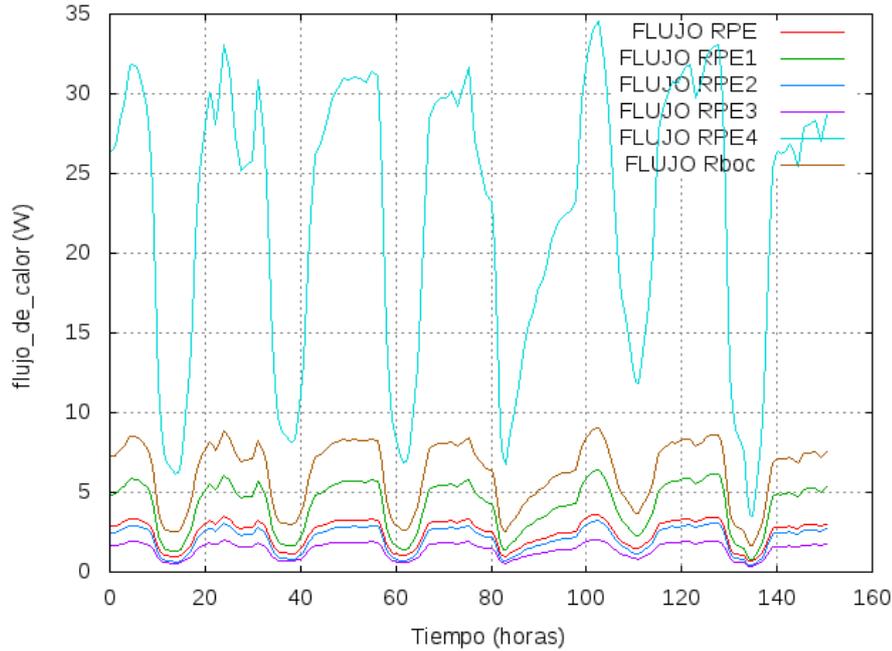


Figura 5. Flujos de calor desde la masa del digestato. Donde: RPE: muro Sur. RPE1: peraltes Norte y Sur del piso. RPE2: piso. RPE3: ambos laterales. RPE4: gasómetro. Rboc: bocas de alimentación/descarga.

De lo analizado para el gráfico anterior, interesó indagar sobre cuál de los mecanismos de transferencia de calor presentes en la zona del gasómetro, era el principal en cuanto a la pérdida de calor.

En la Figura 6 se desglosa el resultado de los flujos de calor por convección, conducción y radiación en el gasómetro. La radiación es el mecanismo más significativo con aproximadamente dos terceras partes de las pérdidas de calor que, en relación a las pérdidas totales, explicaría el 40 % de las mismas. Esto se condice con lo estudiado por Hreiz et al. (2017) que indican que alrededor de un 30 % de las pérdidas de calor del digestato son por radiación desde la superficie del digestato.

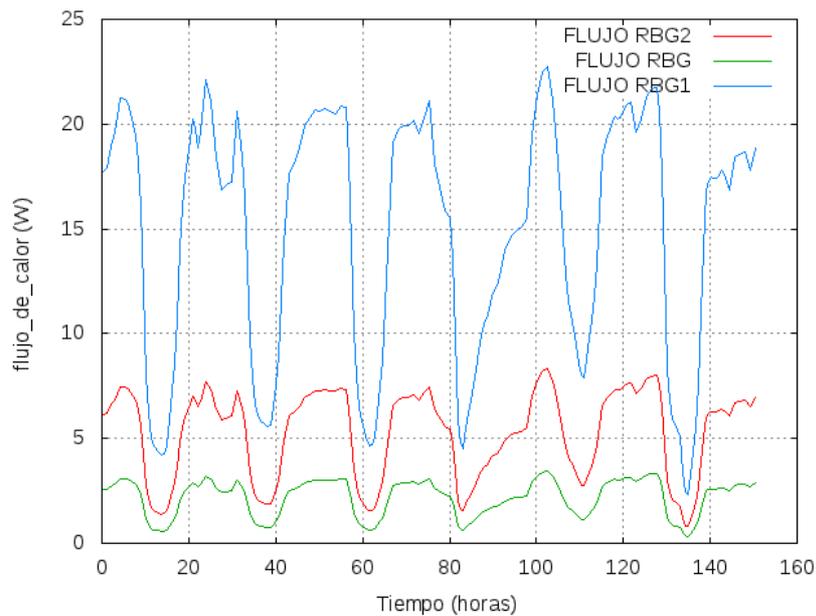


Figura 6. Flujos de calor a través del gasómetro. Donde: RBG2: resistencia convectiva, RBG: resistencia conductiva, RBG1: resistencia radiativa.

El calor perdido a través de las bocas de alimentación y descarga, una zona sin aislamiento, de mucha menor área expuesta, explica un 15 % de las pérdidas de calor.

CONCLUSIONES

El modelado del comportamiento térmico de un sistema de digestión anaerobia con SIMUSOL, incorpora en la temática una herramienta fundamental para mejorar un diseño y conocer con más detalle cómo se distribuyen los flujos de calor en un prototipo.

El modelo se ajusta a la realidad, considerando los datos experimentales seleccionados, lo que permite hacer nuevas simulaciones, variando las condiciones climáticas y poniendo a prueba el diseño del prototipo, virtualmente en otros climas.

El modelo permite identificar la existencia y magnitud de flujos de calor importantes como el existente en el gasómetro. Del mismo modo identificar la necesidad de ampliar el área del plano colector para aumentar la ganancia de calor en el digestato.

Nuevos datos, que surjan de la experimentación en proceso, permitirán realimentar el modelo, con el objetivo de ajustarlo cada vez más a la realidad y a la variabilidad climática presente.

REFERENCIAS

- Fleming, J. G. (2002). Novel simulation of anaerobic digestion using computational fluid dynamics, 208. Retrieved from <http://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/4158/1/etd.pdf>
- González, S. M., Larsen, S. F., Hernández, A., & Lesino, G. (2014). Thermal evaluation and modeling of a double-pass solar collector for air heating. *Energy Procedia*, 57, 2275–2284. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.235>
- Hassanein, A. A. M., Qiu, L., Junting, P., Yihong, G., Witarsa, F., & Hassanain, A. A. (2015). Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy. *Ecological Engineering*, 82, 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.010>
- Hreiz, R., Adouani, N., Jannot, Y., & Pons, M. N. (2017). Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester. *Chemical Engineering Research and Design*, 119, 101–116. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.007>
- INAHE. (s/f). Equipamiento del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía. Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gov.ar/portal/inahe/equipamiento.pdf>
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. US Patent 5,328,671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Jayashankar, B. C., Kishor, J., Goyal, I. C., Sawhney, R. L., & Sodha, M. S. (1989). Solar assisted biogas plants IV: Optimum area for blackening and double glazing over a fixed-dome biogas plant. *International Journal of Energy Research*, 13(2), 193–205. <https://doi.org/10.1002/er.4440130208>
- Orduna D., Buenanueva F., Esteves A. (2007). Biodigestor calefaccionado con energía solar para producción discontinua de biogás. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (INCIHUSA-CONICET).
- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J., & Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*, 124, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.019>
- Preston, T.R., Rodríguez, L., (2002). Low-cost biodigesters at the epicenter of ecological farming systems. Proceedings Biodigester Workshop, March 2002.
- Quiroga, M., Echazú, R., Saravia, L., & Palacios, A. (2006). SIMULACIÓN CON SIMUSOL – LINUX DE INVERNADERO ANDINO DE EL ROSAL, SALTA, 10, 9–13.

- Saravia, L. S., & Alía de Saravia, D. (2014). Acceso al cálculo directo de coeficientes convectivos dentro del programa simusol, 2(8), 7–14.
- Suárez, H. (2012). Invernadero con acondicionamiento térmico solar: modelización con simusol, 16(fig 1), 167–172.
- Swinbank, W. C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339–348. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>
- Velo, E., 2006. Aprovechamiento energético de la biomasa. In: Velo E., Sneij J., Delclòs J. (Eds.), *Energía, participación y sostenibilidad. Tecnología para el desarrollo humano*. Barcelona: Ingeniería Sin Fronteras – ISF. p. 131e44.
- Weatherford, V. C., & Zhai, Z. J. (2015). Affordable solar-assisted biogas digesters for cold climates: Experiment, model, verification and analysis. *Applied Energy*, 146, 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.111>

ABSTRACT

A thermal model of an anaerobic digester previously builded is developed with SIMUSOL. The digester is heated with passive solar energy and insulated to reach the optimal thermal conditions. The computational model represents heat fluxes between the main elements of the prototype envelope, with the ambient air and the sky. For the adjust and validation, an experiment is conducted with 150 hours of measures, and registration of entry data - air temperature, solar radiation, wind speed and 17 temperature nodes inside the prototype. The model is revised with experimental results, checking the differences between simulated and experimental data. A good agreement of this two series of data is reached, that allows to model the thermal behaviour of the prototype and to provide a tool for design improvement.

Keywords: Biodigester, Solar Energy, Thermal Simulation, SIMUSOL

ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA EM SÉRIE E EM PARALELO COM A TEMPERATURA

Felipe Detzel Kipper¹, Fabiano Perin Gasparin¹, Cristiano Saboia Ruschel², Arno Krenzinger²

¹ Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – Rua Sete de Setembro, 1156. Porto Alegre – RS, Brasil. Tel. +55 51 3288 9000

e-mail felipe_kipper@hotmail.com, gasparin.fabiano@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Energia Solar. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre – RS, Brasil. Tel. + 55 51 3308 6841

e-mail: cristianosaboia@gmail.com, arno.krenzinger@ufrgs.br

Recibido 09/08/18, aceptado 20/09/18

RESUMO: O modelo de um diodo é bastante difundido para simular o desempenho de dispositivos fotovoltaicos. Neste trabalho, quatro módulos fotovoltaicos de silício cristalino foram caracterizados em simulador solar em diversas condições de irradiância e temperatura. A resistência em série (R_S) e a resistência em paralelo (R_P) foram extraídas das curvas I-V por um método analítico com objetivo de se obter expressões que modelem sua dependência com a irradiância e temperatura. Os módulos fotovoltaicos foram ensaiados em irradiâncias de 75 a 1000 W/m² e temperaturas de 25 a 65 °C. Não foi obtido uma relação clara da variação de R_P com a temperatura, enquanto que R_S apresentou um aumento linear com a temperatura. A modelagem proposta da dependência de R_S com a temperatura e irradiância pode ser inserida no modelo de um diodo a fim de aumentar a precisão do cálculo das curvas I-V em ampla faixa de operação.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, resistência em série, resistência em paralelo.

INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica é crescente em todo o planeta e sua utilização torna-se cada vez mais importante a medida em que novas tecnologias surgem, evoluem e se incorporam na vida da população, permitindo a expansão da economia, criação de empregos, avanço tecnológico e produção de alimentos em grande escala. O aumento do consumo de energia elétrica traz à tona a preocupação mundial com a emissão de gases do efeito estufa, tanto é que a redução das emissões de gases tornou-se tema constante em debates na sociedade contemporânea, visto que há dependência da matriz elétrica global dos combustíveis fósseis. Outro fator preocupante é a volatilidade do preço dos produtos derivados do petróleo, já que estes são *commodities* cujos preços apresentam grandes flutuações influenciadas pelo balanço de oferta e demanda, suas expectativas, e eventos geopolíticos.

No Brasil, a matriz elétrica é composta majoritariamente por usinas hidrelétricas, que são dependentes da abundância dos períodos de chuvas. Desse modo, é necessário que exista um suporte de usinas termelétricas que são acionadas em períodos de hidrologia desfavorável. Esse acionamento é responsável por aumentar as emissões de gases de efeito estufa e contribui para o aumento da tarifa de energia. Sendo assim, a diversificação da matriz elétrica com fontes renováveis pode auxiliar na complementação da produção de eletricidade sem aumento de emissões.

A energia solar fotovoltaica, que é a conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, surge como uma alternativa viável já que é uma fonte renovável, limpa, confiável e que vêm se expandindo globalmente devido à queda nos custos de instalação dos sistemas fotovoltaicos. Por possuir uma característica modular é possível fazer desde a instalação de pequenos sistemas que ocupam áreas de telhado até grandes usinas fotovoltaicas.

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia intermitente, que é dependente de diversos fatores, entre eles a disponibilidade de radiação solar, inclinação do módulo fotovoltaico, temperatura de operação, acúmulo de partículas sobre os módulos, eficiência de operação dos módulos e inversores, degradação do sistema ao longo do período de uso, entre outros. Em vista dessas particularidades é necessário que se faça uso de ferramentas que possam estimar e simular o desempenho dos diferentes componentes do sistema ao longo do tempo.

Normalmente, empregam-se programas de simulação computacional com modelos matemáticos para estimar o desempenho do sistema. Espera-se que o programa de simulação seja confiável, preciso e ainda apresente uma interface intuitiva ao usuário, proporcionando o uso do programa sem muitas dificuldades. Caso o modelo não seja preciso, há um aumento na incerteza associada à estimativa de produção, dificultando a decisão de investimento no sistema fotovoltaico. O uso da simulação da operação também pode ser uma ferramenta de supervisão das condições de operação dos diferentes componentes do sistema fotovoltaico, prevenindo possíveis falhas a partir de diferenças entre os dados reais e os dados simulados concomitantemente (Ruschel *et al.*, 2016).

A célula fotovoltaica é o elemento fundamental de conversão da energia solar em energia elétrica. A célula pode ser descrita e estudada de maneira eficiente por um modelo baseado em elementos de um circuito elétrico equivalente com o intuito de facilitar a compreensão e o seu uso. Shockley (1950) propôs uma equação para determinar a corrente do diodo, que pode ser utilizada para expressar as características da curva I-V de uma célula fotovoltaica ideal através da Equação (1):

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Na Equação (1), I_{fg} é a fotocorrente gerada pela célula, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, q é a carga do elétron, V é a tensão aplicada nos terminais da célula, m é o fator de idealidade do diodo, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta da célula. Essa equação é utilizada para representar apenas uma célula, entretanto, quando se pretende representar um módulo fotovoltaico é necessário adicionar um termo que represente o número de células associadas em série (N_s), dessa forma obtêm-se a Equação (2).

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{N_s mkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

A Equação (2) representa o comportamento de um módulo fotovoltaico ideal. Entretanto, adicionando um elemento resistivo em série ao diodo, R_s , é possível obter uma melhor descrição das características da curva I-V dos módulos fotovoltaicos. Com o acréscimo da variável R_s ao modelo do diodo ideal o número de parâmetros aumenta para quatro. Esse modelo é conhecido por modelo de quatro parâmetros, descrito pela Equação (3).

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s mkT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Com o acréscimo de mais um elemento resistivo, uma resistência em paralelo (R_p), obtêm-se o modelo de um diodo de cinco parâmetros para módulos fotovoltaicos, descrito pela Equação (4).

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4)$$

Assim, no modelo de um diodo de cinco parâmetros, a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico é representada por uma fonte de corrente, a junção PN é análoga a um diodo que incorpora os efeitos da corrente de saturação reversa e fator de idealidade do diodo. A resistência em série (R_S) e a resistência em paralelo (R_P) reúnem em um componente resistivo diversos fatores que originam perdas de potência. O modelo de um diodo de cinco parâmetros, representado na Figura 1 e descrito pela Equação (4), é amplamente utilizado para modelar o comportamento elétrico das células e módulos fotovoltaicos. Atualmente, é um dos modelos mais empregados para a simulação do desempenho dos módulos fotovoltaicos, visto que possui boa resposta considerando sua simplicidade e precisão.

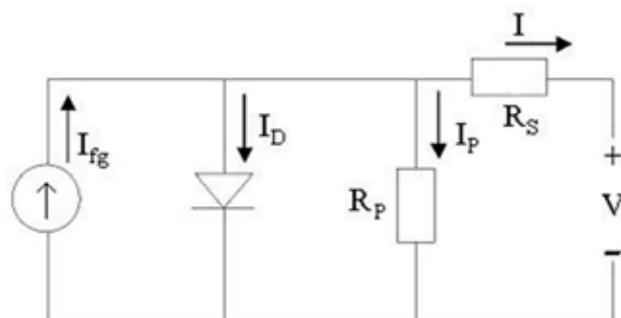


Figura 1: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.

A resistência em série de uma célula fotovoltaica é um parâmetro global que compreende principalmente perdas no contato superior da célula, resistência do material da célula, resistência do contato da grade condutora na face anterior da célula e resistência ao longo do barramento e dos dedos de contato da parte anterior da célula. Já a resistência em paralelo tem origem, principalmente, em fugas de correntes pelas bordas das células, em pequenos curto circuitos ou qualquer outro caminho alternativo para a corrente fotogerada.

Em uma célula real é interessante que o valor de R_S seja o menor possível, próximo a zero, enquanto que o valor da resistência em paralelo deve ser o mais elevado possível (van Dyk e Meyer, 2004). Silva *et al.* (2016) reforçam o fato de que as células fotovoltaicas apresentam redução de eficiência durante a operação devido à dissipação de energia através de resistências internas e que é importante manter R_S com um valor reduzido, pois seu incremento causa redução da potência entregue pelo sistema.

De Soto *et al.* (2006) propõem considerar a variação de R_P de maneira inversamente proporcional com a irradiância e R_S constante. Os autores não mencionam a variação das resistências com a temperatura. Cerna *et al.* (2012) verificaram que a resistência em série dos módulos fotovoltaicos aumenta ligeiramente com a temperatura, e ao mesmo tempo apresenta redução mais significativa com o aumento da irradiância. Afirmam ainda que a dependência da resistência em série com a irradiância causa uma pequena variação na dependência da eficiência do módulo fotovoltaico com a irradiância.

Ghani *et al.* (2015) verificaram o aumento de R_S linearmente com a temperatura. A dependência de R_S com a temperatura ficou evidente no trabalho, já que apresentou aumento de cerca de 65% com a temperatura variando de 25 para 70 °C. A resistência em paralelo apresentou redução de cerca de 30% para a mesma variação de temperatura.

Van Dyk e Meyer (2004) comprovam que um aumento do R_S em cinco vezes, de 0,36 Ω para 1,8 Ω , implica na redução dos parâmetros de potência máxima (P_m) e fator de preenchimento (FF) em 25%. Já um aumento de dez vezes no valor de R_S , de 0,36 Ω para 3,6 Ω , reduz os

mesmos parâmetros em até 50%. Valores muito baixos de R_p tem um impacto severo na performance do módulo fotovoltaico. Em casos de níveis de irradiância mais baixos, mesmo com valores de R_p um pouco mais elevados, o impacto de R_p ainda é muito prejudicial ao funcionamento do sistema fotovoltaico. Ficou evidenciado no trabalho que valores muito pequenos de R_p são prejudiciais ao desempenho dos módulos fotovoltaicos, favorecem o aparecimento de pontos quentes (*hot spots*) nas células sombreadas e ainda reduzindo a eficiência com a redução dos níveis de irradiação incidente. Os resultados da investigação dos efeitos das resistências parasitas mostram que o aumento de R_s em conjunto com o efeito Staebler-Wronski, efeito que ocorre nas primeiras horas de exposição dos módulos ao Sol fazendo o rendimento cair a um terço do rendimento máximo, resulta na perda de 50% da potência em módulos de silício amorfo (a-Si). O módulo CIS apresentou redução de 29% no valor de R_p após o mesmo período de exposição e mesmas condições do módulo de a-Si, o que implica na perda de 6% de potência com irradiância de 1000 W/m². Com irradiância de 614 W/m² a perda de potência chega a 43%, enquanto que com irradiância de 169 W/m² a perda de potência é de 87%.

Basit *et al.* (2013) demonstraram que a redução de R_p e aumento de R_s causam redução do FF e da potência máxima. A redução excessiva de R_p causa queda na tensão de circuito aberto (V_{OC}) enquanto que o aumento de R_s causa queda na corrente de curto-circuito (I_{SC}). O efeito do aumento de R_s na curva I-V é ilustrado na Figura 2, onde são apresentadas curvas calculadas pelo modelo de um diodo para um módulo fotovoltaico típico de 60 células de 156 mm, a 1000 W/m² e 25 °C. Consequentemente a potência e FF acabam sendo afetados negativamente pelo efeito da resistência em série.

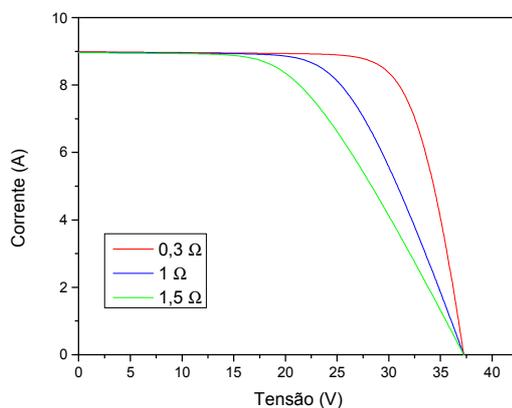


Figura 2: Variação da curva I-V com diferentes valores de R_s para um módulo fotovoltaico típico de 60 células nas condições de teste padrão.

Ruschel *et al.* (2016) analisaram seis grupos de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias, um grupo de módulos de silício multicristalino, um segundo de silício monocristalino, um terceiro com tecnologia CIGS, um quarto com tecnologia de silício amorfo, um quinto grupo com células tandem com silício amorfo/multicristalino e por fim, um grupo com tecnologia Telureto de Cádmio. Os autores relataram uma tendência de aumento da resistência em paralelo em todos os grupos em condições de baixa irradiância. Foram observadas divergências entre as diferentes tecnologias fotovoltaicas. Módulos CIGS apresentaram menor variação da resistência em paralelo com a irradiância, com o valor máximo sendo, aproximadamente, sete vezes maior que o referenciado na STC (*standart test conditions*), que tem irradiância de 1000 W/m², temperatura da célula de 25 °C e espectro AM 1,5. Já os módulos de tecnologia tandem apresentaram variação de 40 vezes entre o valor de referência e a menor irradiância medida. O módulo de telureto de cádmio apresentou aumento de nove vezes na resistência em paralelo com

o decréscimo da irradiância de 1000 W/m² para 100 W/m², e a 75 W/m² o valor obtido para este parâmetro foi 76 vezes maior que o valor de referência.

Na maioria dos casos, os parâmetros R_S e R_P não são fornecidos pelos fabricantes nos *datasheets*. Em alguns casos é possível por meios matemáticos encontrar esses dados nas condições de *STC*, ou extraí-los diretamente de curvas I-V medidas em *STC*. Entretanto, a operação do sistema fotovoltaico dificilmente ocorre nestas condições, sendo necessário calcular tais parâmetros em todas as condições de operação. Para considerar os valores de R_S e R_P em toda a faixa de operação dos módulos fotovoltaicos é necessária uma relação matemática para descrever a dependência das resistências tanto com a irradiância como com a temperatura.

O comportamento de R_P e R_S com a irradiância já está suficientemente estabelecido na literatura, porém ainda há uma importante lacuna na descrição do comportamento de R_S com a irradiância e a temperatura simultaneamente. A investigação da dependência de R_P com a variação de temperatura também é alvo de investigação por não estar suficientemente estabelecida. Desta maneira, o objetivo principal deste trabalho é identificar relações que modelem o comportamento de R_P e R_S com a temperatura e irradiância a partir de medidas e análise de curvas I-V em diversas condições de operação.

METODOLOGIA

Os parâmetros R_S e R_P são facilmente calculados uma vez que se tenha as curvas I-V medidas. Outra maneira é pela utilização de meios matemáticos a partir dos dados do fabricante. As curvas I-V podem ser medidas utilizando um simulador solar (*indoor*) ou com iluminação natural (*outdoor*).

O método *indoor*, que foi o método utilizado para a obtenção dos parâmetros deste trabalho, consiste em utilizar uma fonte artificial de luz, ou seja, um simulador solar para possibilitar a determinação da curva I-V em condições controladas. Para determinação das curvas I-V em várias temperaturas, o módulo fotovoltaico é acomodado em uma câmara termostática a fim de se regular a temperatura até o valor requerido. Quando a temperatura está estabilizada, a câmara é momentaneamente aberta para expor o módulo à radiação para que se faça a medida da curva I-V, repetindo-se o procedimento para diversos valores de temperatura. Neste método de obtenção dos parâmetros, a temperatura do módulo deve ser uniforme em toda sua extensão, de modo que as incertezas das medidas sejam reduzidas. A variação da temperatura do módulo fotovoltaico no método *indoor* é normalmente mais lenta, já que o tempo para a temperatura do módulo estabelecer-se depende da potência utilizada no aquecimento. É importante salientar que o método *indoor* é independente de condições climáticas, facilitando a realização de ensaios.

No método *outdoor*, os módulos fotovoltaicos devem ser acomodados em um suporte para exposição solar com uma cobertura para bloquear a incidência da radiação antes do início das medidas. Para determinar curvas I-V em várias temperaturas, o módulo fotovoltaico deve iniciar o ensaio com temperatura próxima a 25 °C. Pode-se fazer o resfriamento utilizando algum fluido enquanto o módulo é mantido protegido da radiação solar (Gasparin e Krenzinger, 2015). O tempo de ensaio *outdoor* para realizar medidas em diversas temperaturas depende da taxa de aquecimento do módulo, que é função da irradiância incidente, da temperatura ambiente e da massa do módulo, sendo em geral de 15 a 20 minutos. No método *outdoor* todas as curvas I-V devem ser corrigidas para a mesma irradiância solar para obtenção dos coeficientes térmicos.

Os módulos fotovoltaicos dispostos na Tabela 1 foram submetidos a testes com variação da temperatura entre 25 e 65 °C, com incrementos de 10 °C a cada nova medida, e irradiância entre 75 e 1000 W/m². Para a caracterização dos módulos fotovoltaicos utilizou-se um simulador solar do tipo LAPSS (*Large Area Pulsed Solar Simulator*), modelo PASAN SunSim 3C, que

está instalado nas dependências do Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Módulo	Tecnologia	Potência (W)	Células em série
A	Silício monocristalino	260	60
B	Silício monocristalino	265	60
C	Silício multicristalino	315	72
D	Silício multicristalino	245	60

Tabela 1: Características nominais dos módulos testados.

O simulador solar possui flash de 10 ms e uma área de iluminação de 2 m x 2 m para o dispositivo que está sendo testado. A precisão elétrica é de, ao menos, 0,2% nas medidas de tensão e corrente, e a colimação da luz é menor que 15°. As características deste equipamento são consideravelmente superiores aos de um simulador solar classe A, que o torna adequado para a coleta dos dados necessários para a realização deste trabalho. A não uniformidade espacial medida no local após a instalação do simulador foi de 0,27% (Ruschel *et al.* 2016). As principais características do simulador solar utilizado estão expostas na Tabela 2.

Características	Simulador Solar Classe A	LAPSS PASAN SunSim 3C
Não uniformidade	2%	<1%
Instabilidade Temporal	2%	<1%
Relação de Correspondência do Espectro	0,75 – 1,25	0,875 – 1,125

Tabela 2: Características do LAPSS e requerimentos da IEC 60904-9 (2007) para simulador solar classe A.

Para a realização do estudo foram medidas as curvas I-V dos quatro módulos dispostos na Tabela 1 e assim obtida uma matriz de curvas com temperaturas de 25 a 65 °C e irradiância de 75 a 1000 W/m², de modo a se obter a variação dos parâmetros com as duas variáveis. A temperatura do módulo é variada com o auxílio de uma câmara de aquecimento com temperatura controlada. A câmara, ilustrada na Figura 3, possui dimensões aproximadas de 2,2 m x 1,35 m, comportando a maioria dos módulos fotovoltaicos convencionais. O aquecimento é realizado por resistências de fio que foram inseridas em uma placa de policarbonato vertical instalada no fundo da câmara, que totalizam aproximadamente 2500 W. O controle da temperatura é feito por um controlador Novus N1100, tendo como sensor um Pt 100 que é fixado na parte traseira do módulo. A câmara é equipada com ventiladores na parte inferior e superior ao suporte do módulo fotovoltaico para auxílio do processo de convecção forçada e uniformização da temperatura, que funcionam quando a porta está fechada. A uniformidade de temperatura foi medida por meio de 9 sensores Pt 100 fixados na parte traseira do módulo e lidos por uma unidade de aquisição Agilent 34970. A não uniformidade aumenta para temperaturas maiores, chegando a variações de ± 3 °C.

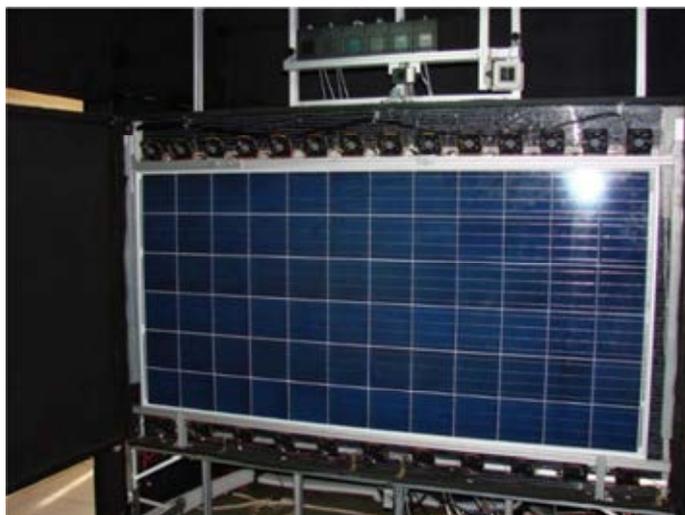


Figura 3: Câmara de aquecimento aberta com um módulo fotovoltaico inserido.

Os parâmetros das curvas I-V foram extraídos pelo método analítico proposto por Phang *et al.* (1984) e foram organizados em uma matriz de dados para cada um dos quatro módulos dispostos na Tabela 1, contendo dados de R_S e R_P , em função da temperatura e irradiância. As curvas I-V foram medidas com o módulo em temperatura estabilizada e uniforme ao longo de sua superfície, mantida pela câmara termostática.

RESULTADOS

Os dados de R_P foram normalizados em função do próprio parâmetro na temperatura de 25 °C, a fim de manter um padrão e facilitar seu tratamento. Entretanto, os valores de R_P não apresentaram um comportamento que permita obter uma conclusão da dependência de R_P com a temperatura, visto que houve elevada dispersão. A expressão de regressão obtida não permitiu obter um modelo do comportamento do parâmetro, como apresentado no gráfico da Figura 4, onde praticamente inexistente correlação.

Figura 4: Resistência em paralelo normalizada em função da temperatura de todos os módulos testados em todas as irradiâncias.

Para R_S , de maneira semelhante que em R_P , embora possa ser identificada a tendência de aumento de R_S com a temperatura, os dados apresentaram uma grande dispersão. A expressão de

regressão obtida tem correlação muito baixa para representar diretamente o comportamento do parâmetro com a precisão adequada. A Figura 5 apresenta o comportamento de R_S normalizado em função da temperatura, onde são reunidos os dados dos quatro módulos testados em todas as irradiâncias.

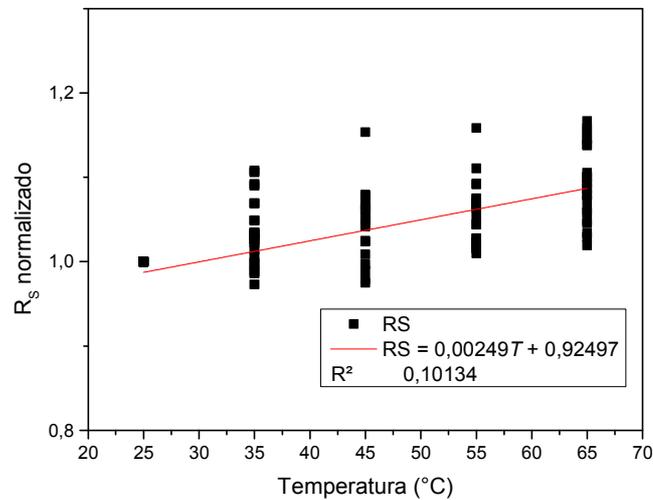


Figura 5: Resistência em série normalizada em função da temperatura de todos os módulos testados em todas as irradiâncias.

Entretanto, os dados de R_{S0} , definido como o inverso da declividade da curva I-V na região de circuito aberto, apresentaram uma correlação melhor do que a Figura 5 apresenta, permitindo que a expressão de regressão linear modelasse o comportamento do parâmetro com a temperatura de maneira adequada. O gráfico da Figura 6 apresenta o comportamento da variação de R_{S0} normalizado, mostrando claramente um incremento desse parâmetro com a temperatura.

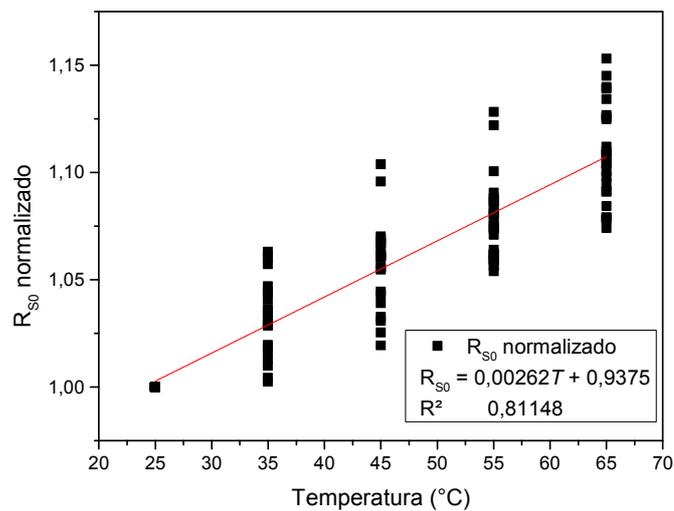


Figura 6: R_{S0} normalizado em função da temperatura de todos os módulos testados em todas as irradiâncias.

Os valores de R_{S0} mostram que o parâmetro tende a aumentar com a temperatura, como ilustrado pelo gráfico da Figura 6. Com o objetivo de ilustrar que é possível utilizar para

computar a variação de R_S com a temperatura a mesma taxa de variação de R_{S0} com a temperatura, expressou-se graficamente a correlação de R_S e R_{S0} apresentada na Figura 7, na qual o coeficiente angular da reta obtida é próximo da unidade. Embora o coeficiente de correlação R^2 seja da ordem de 0,7, a reta obtida representa adequadamente o comportamento geral da variação de R_S com a temperatura. Este resultado permite a que a taxa de variação de R_{S0} com a temperatura seja diretamente aplicada como taxa de variação de R_S com a temperatura.

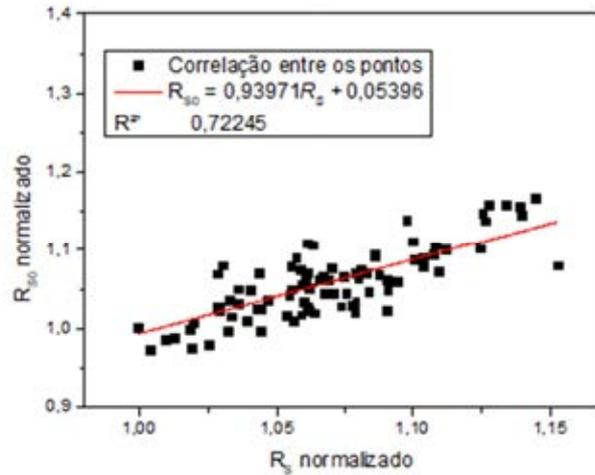


Figura 7: Correlação de R_S com R_{S0} normalizados.

Para que se modele o comportamento de R_S com a temperatura e a irradiância, elaborou-se uma equação na qual R_S é dependente dos fatores temperatura e irradiância, partindo-se da hipótese de que as variáveis são independentes, cuja pertinência será avaliada nos resultados.

Para relacionar R_S com a irradiância utilizou-se a equação proposta por Reichert (2016) com arredondamento dos valores, pois não altera a essência do modelo e torna a equação mais simples. A Equação (5) representa o comportamento de R_S apenas em relação à irradiância solar.

$$R_S(G) = R_{S_STC} \cdot 10 \cdot G^{-1/3} \quad (5)$$

Na Equação (5), G é a irradiância e R_{S_STC} é o valor da resistência em série obtida na irradiância de 1000 W/m² e temperatura de 25 °C. Para encontrar a relação de R_S com a temperatura, tomou-se a variação de R_{S0} com a temperatura, de modo que fosse possível relacionar R_S com a temperatura mantendo a precisão da expressão de regressão em determinar o comportamento do parâmetro. A Equação (6) apresenta a expressão obtida para essa relação, onde T é a temperatura.

$$R_S(T) = (0,0026T + 0,9373) \quad (6)$$

Combinando as Equações (5) e (6) obtêm-se a Equação (7), que determina o valor de R_S com a dependência da temperatura e irradiância.

$$R_S(G, T) = (0,0026T + 0,9373) \cdot (R_{S_STC} \cdot 10 \cdot G^{-1/3}) \quad (7)$$

De posse desta equação, a próxima etapa consiste em realizar uma comparação entre os valores de R_S obtidos experimentalmente e os calculados com a Equação (7). Os erros na determinação de R_S pelo método analítico não foram avaliados neste trabalho, e serão tema de investigação

futura. O gráfico da Figura 8 apresenta a variação de R_S com a temperatura e irradiância do módulo A descrito na Tabela 1. Pelo gráfico percebe-se que o comportamento de R_S é modelado adequadamente pela Equação (7), mostrando uma certa dispersão, porém representando o comportamento geral da variação de R_S em várias irradiâncias e temperaturas.

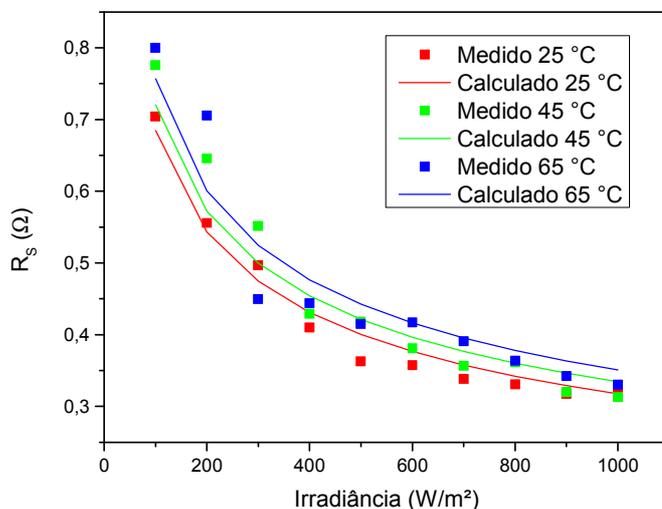


Figura 8: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico A.

O gráfico da Figura 9 apresenta os resultados obtidos para o módulo B. Verifica-se que para este módulo fotovoltaico o modelo representa o comportamento geral da variação de R_S com a irradiância e temperatura, embora as curvas do modelo estejam um pouco defasadas em relação aos pontos medidos.

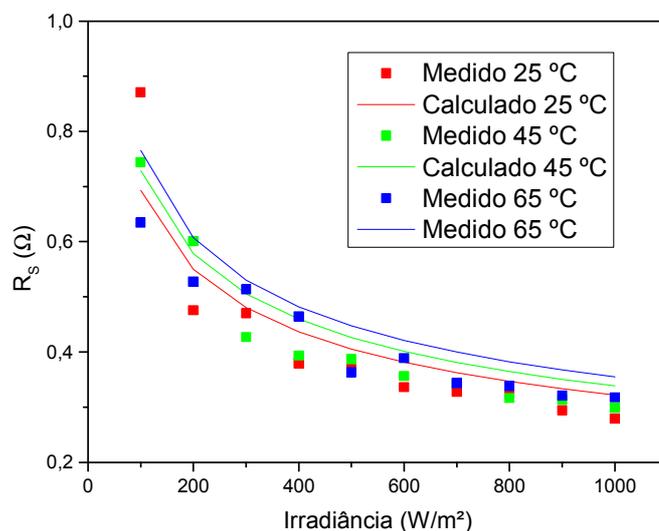


Figura 9: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico B.

O gráfico da Figura 10 apresenta a variação de R_S com a temperatura e a irradiância do módulo C e, como é possível constatar, o comportamento de R_S é análogo aos casos anteriores. Como é

visto na Figura 8 e na Figura 9, R_S tem uma dependência com a temperatura de operação da célula e com a irradiância solar.

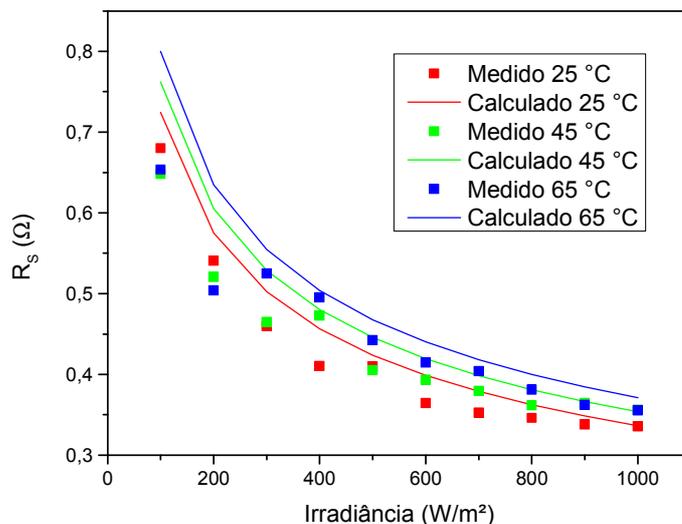


Figura 10: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico C.

O gráfico da Figura 11 apresenta a variação de R_S com a temperatura e a irradiância do módulo D e, como é possível constatar, o comportamento de R_S é análogo aos casos anteriores, inclusive apresentando os melhores resultados. Neste módulo houve duas medidas de R_S a 45 °C que apresentaram valores discrepantes da tendência geral. Nestas medidas houve algum erro aleatório experimental não identificado. Estes pontos foram mantidos no gráfico para fins ilustrativos.

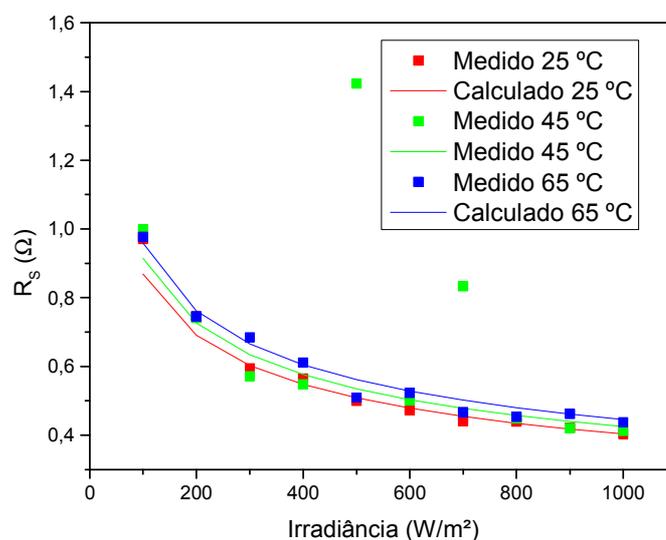


Figura 11: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico D.

Nas Figuras 8–11 há uma certa dispersão entre os dados medidos e o modelo, porém a Equação (7) se mostrou adequada para considerar o comportamento do parâmetro R_S com dependência

da temperatura e irradiância, e a hipótese da independência das duas variáveis mostrou-se adequada.

CONCLUSÕES

Foram analisadas um conjunto de curvas I-V obtidas com simulador solar de quatro módulos fotovoltaicos de tecnologia de silício cristalino, em diversas condições de temperatura e irradiância. Os resultados obtidos não permitiram a obtenção de uma expressão que modelasse o comportamento da resistência em paralelo em função da temperatura.

Com relação à resistência em série, este trabalho propõe uma expressão que modela o comportamento deste parâmetro considerando a influência da temperatura e irradiância. A dependência da resistência em série com a temperatura mostrou-se linear, com aumento do parâmetro da ordem de 0,26 % do seu valor para cada incremento de 1°C na temperatura. A equação para modelar o comportamento de R_S dependente da temperatura e irradiância solar mostrou-se adequada para os módulos ensaiados de silício cristalino.

A variação de R_S é predominantemente decorrente da irradiância solar, sendo que o valor aumenta para menores irradiância, com uma pequena dependência linear relativa à temperatura. O acréscimo da equação proposta neste trabalho ao cálculo da curva I-V em diferentes condições, principalmente em altas temperaturas e baixas irradiâncias, tem potencial de melhorar a precisão do modelo de um diodo em programas de simulação do desempenho de módulos fotovoltaicos em ampla faixa de operação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- El-Basit, W., A., El-Maksood, A., M., A., Soliman, F., A., E.-M., S. (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. Leonardo Journal of Sciences, vol. 23, pp. 13–28.
- Cerna, L., Benda, V., Machacek, Z. (2012). A note on irradiance dependence of photovoltaic cell and module parameters. IEEE, 28th International Conference on Microelectronics Proceedings.
- De Soto, W. *et al.* (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy. Volume 80, Issue 1, January 2006, Pages 78-88
- Gasparin, F., P., Krenzinger, A. (2015). Comparação entre coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos determinados com simulador solar e com iluminação natural. Revista Brasileira de Energia Solar, vol 6, n. 2, p. 102 -111.
- Ghani, F., Rosengarten, G., Duke, M., Carson, J., K. (2015). On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. Solar Energy, vol. 112, pp. 437-445.
- IEC 60904-9 (2007) (International Electrotechnical Commission) Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements.
- Phang, J.C.H., Chan, D.S.H., Phillips, J.R., 1984. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters. Electron. Lett. 20 (10), 406–408.
- Reichert, H., H. (2016). Análise do modelo de um diodo para módulos fotovoltaicos com a resistência em série e em paralelo dependente da irradiância solar. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação). Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Curso de Engenharia em Energia. Novo Hamburgo.
- Ruschel, C., S., Gasparin, F.P., Costa, E.R., Krenzinger, A. (2016). Assessment of PV modules shunt resistance dependence on solar irradiance. Solar Energy, vol 133, pp. 35-43.
- Silva, E., A., Bradaschia, F., Cavalcanti, M., C., Nascimento Junior, A., J., Michels., L., Pietta Junior, L., P. (2016). Parameter Estimation Method to Improve the Accuracy of

Photovoltaic Electrical Model IEEE Journal of Photovoltaics. Volume: 6, Issue: 1, Jan. 2016.

Shockley, W. (1950). Electrons and holes in semiconductors. Van Nostrand, Nova Iorque, Estados Unidos da América.

Van Dyk, E. E., Meyer, E., L., (2004). Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. Renew Energy, vol. 29, issue 3, pp. 333–344.

TESTING OF PHOTOVOLTAIC MODULES FOR ANALYSIS OF SERIES AND SHUNT RESISTANCE VARIATION WITH TEMPERATURE

ABSTRACT. The single diode model is quite widespread to simulate the performance of photovoltaic devices. In this work, four crystalline silicon photovoltaic modules were characterized in solar simulator under various conditions of irradiance and temperature. The series resistance (R_s) and the shunt resistance (R_p) were extracted from the I-V curves by analytical methods in order to obtain expressions that model their behavior with the irradiance and temperature. The photovoltaic modules were tested at irradiances of 75 to 1000 W / m² and at temperatures of 25 to 65 ° C. A clear behavior of the variation of R_p with temperature was not identified, while R_s presented a linear behavior with temperature. The proposed model considering the dependence of R_s with temperature and irradiance can be inserted into the single diode model in order to increase the precision of the calculation of the I-V curves over a wide operation range.

Keywords: Photovoltaic solar energy, series resistance, shunt resistance.

AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ENERGÉTICA DE UNIDADES PROSSUMIDORAS RESIDENCIAIS COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM OPERAÇÃO NO SUL DO BRASIL

L.T. Scarabelot¹, G. A. Rampinelli², C. R. Rambo³.

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -
leticia.scarabelot@posgrad.ufsc.br

²Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Energia e Sustentabilidade -
giuliano.rampinelli@ufsc.br

³Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica -
carlos.rambo@ufsc.br

Recibido 07/08/18, aceptado 19/09/18

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise do sistema de compensação de energia elétrica a partir do monitoramento contínuo de variáveis energéticas e elétricas de sistemas fotovoltaicos integrados em unidades consumidoras residenciais considerando aspectos econômicos e perfis de injeção de energia elétrica na rede de distribuição. As potências nominais dos sistemas fotovoltaicos são de 1,25 kW_p, 2,08 kW_p e 3,71 kW_p. A produtividade anual dos sistemas fotovoltaicos foi de 1272,6 kWh/kW_p, 1299,5 kWh/kW_p e 1246,1 kWh/kW_p enquanto que a energia elétrica que é injetada na rede representa uma fração de 63 %, 65 % e 56 % da energia elétrica gerada, considerando cada sistema deste estudo. A redução no consumo de energia elétrica das unidades prossumidoras foi de 68 %, 95 % e 63 % e o tempo de retorno de investimento foi de aproximadamente 6 anos e 7 meses.

Palavras chave: energia solar, geração distribuída, prossumidor, sistema de compensação.

INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) para geração de energia elétrica vem crescendo rapidamente, influenciada pela redução de preços dos diferentes componentes, maturidade e confiabilidade tecnológica e principalmente a partir da regulamentação, normatização, certificação e incentivos governamentais à energia solar (Breyer et al, 2013; Davi et al, 2016).

No Brasil, o ponto de partida para a regulamentação da micro e minigeração distribuída aconteceu com a publicação da Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (ANEEL, 2012). O sistema de compensação de energia, internacionalmente conhecido como *net metering* (Figura 1), consiste em medir o fluxo de energia elétrica nos dois sentidos em uma unidade consumidora que possui geração, ou seja, é realizada a contabilização entre a energia consumida e a energia exportada ou injetada para a rede, dessa forma o faturamento é dado somente pela energia ativa (Darghouth et al, 2011; Eid et al, 2014). Não há comercialização de energia elétrica se ao final do período de faturamento a energia elétrica injetada for maior que a energia elétrica consumida. Neste caso, a unidade consumidora recebe créditos de energia elétrica. O excedente que não foi utilizado no mês corrente deve ser utilizado para compensação em meses subsequentes.

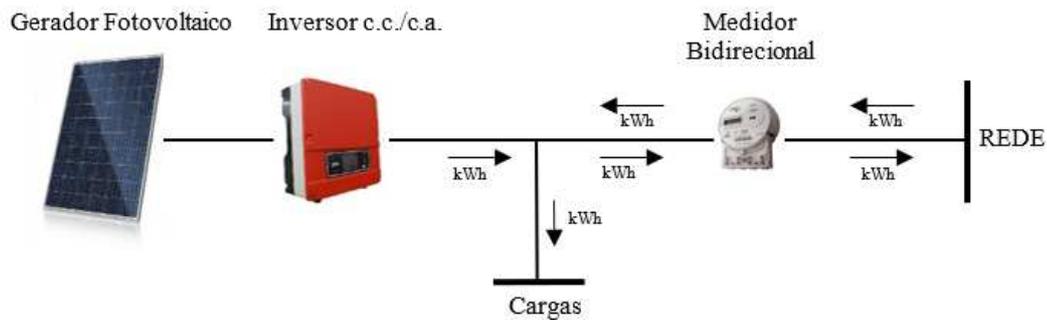


Figura 1: Sistema de compensação net metering (Scarabelot et al, 2018).

A Figura 2, mostra que 79,4 % dos sistemas de geração distribuída estão instalados em unidades consumidoras residenciais (ANEEL, 2017), uma vez que nesta classe se encontram as maiores tarifas de energia elétrica e a maior viabilidade técnica e econômica (Holderman et al, 2014). Devido ao perfil de consumo destas unidades consumidoras, os níveis ou frações de energia elétrica injetada na rede em residências no Brasil são altos (Davi et al., 2016).

Em 2015 houve a publicação da Resolução Normativa nº 687/2015, pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que revisa e atualiza a Resolução Normativa nº 482/2012, definindo novas potências em duas categorias: a microgeração distribuída que contempla sistemas com potência instalada de até 75 kW e a minigeração distribuída caracterizada como uma central geradora de energia elétrica, com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para fonte hídrica). Houve a redução dos prazos para conexão dos sistemas, novas possibilidades como a geração compartilhada e a geração em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, a consolidação do modelo de auto consumo remoto, o melhoramento das informações das faturas, facilitando o entendimento dos clientes geradores de energia e aumentando o público alvo (ANEEL, 2015).

A paridade tarifária, ou seja, a equivalência de custo entre a energia elétrica fornecida pela concessionária de distribuição e a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico da unidade consumidora, ocorreu primeiramente na Europa por volta do ano 2010, especificamente para o mercado residencial na Itália. As principais características para esse marco foi o elevado recurso solar disponível e as altas tarifas de energia elétrica (Breyer & Gerlach, 2013).

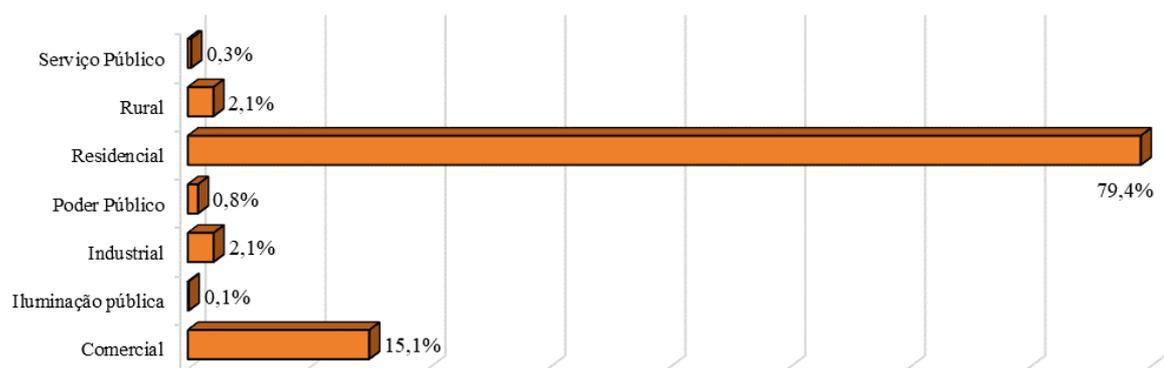


Figura 2: Unidades prossumidoras, por classe de consumo (ANEEL, 2017).

A geração distribuída, é caracterizada por pequenos geradores de energia elétrica conectados à rede de distribuição da concessionária local, sendo assim possível que cada consumidor gere sua própria energia elétrica (Lacchini & Rüther, 2015).

A aplicação dos sistemas fotovoltaicos em unidades consumidoras residenciais implica em várias vantagens econômicas e técnicas, por exemplo, redução dos custos operacionais, adiamento de

atualização das linhas de distribuição, menores perdas por transmissão e distribuição, aumento na qualidade do serviço para o cliente, rápida implementação e modularidade (Islam et al., 2015). Além disso, o setor residencial no Brasil em 2013, correspondia a aproximadamente 26 % do consumo de energia elétrica e teve o maior índice de crescimento. O principal fator no crescimento da demanda de energia elétrica é a popularização de equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos (Villareal & Moreira, 2016).

Este trabalho apresenta uma análise do sistema de compensação de energia elétrica em unidades prosumidoras residenciais no Sul do Brasil. O estudo é realizado a partir do monitoramento de variáveis energéticas e elétricas de sistemas fotovoltaicos integrados em unidades consumidoras residenciais. Para a análise são considerados aspectos econômicos, indicadores de desempenho e características de injeção de energia elétrica na rede de distribuição.

MATERIAIS E MÉTODOS

As principais características dos sistemas fotovoltaicos monitorados e analisados neste trabalho são apresentadas na Tabela 1. Os sistemas fotovoltaicos estão em operação no Sul do Brasil.

		SFCR 1	SFCR 2	SFCR 3
Arranjo Fotovoltaico	Potência Instalada:	1250 Wp	2080 Wp	3710 Wp
	Potência Individual:	250 Wp	260 Wp	265 Wp
	Quantidade de Módulos:	5	8	14
	Strings:	1	1	2
Inversor	Modelo:	PHB1500-SS	PHB3000-SS	ABB PVI 3.6 OUTD
	Potência:	1500 W	3000 W	3600 W
Ângulos	Inclinação:	25 °	20 °	20 °
	Azimute:	60 ° Leste	60 ° Oeste	0 °
Local de Instalação		Turvo/SC	Turvo/SC	Criciúma/SC
Tempo de monitoramento		12 meses	12 meses	12 meses

Tabela 1: Características dos SFCRs instalados nas unidades prosumidoras.

O perfil residencial de consumo e a geração de energia elétrica medida foram avaliados a partir de dados dos sistemas coletados durante 12 meses. Os dados de geração de energia elétrica medida dos SFCRs foram levantados a partir da plataforma dos fabricantes, através do monitoramento remoto integrado aos inversores e com base nas faturas de energia elétrica mensais foram extraídos os dados de consumo da rede e injeção de energia elétrica na rede. Com estas informações foi determinada a energia elétrica consumida instantaneamente de cada unidade prosumidora.

A análise de fluxo de caixa descontado foi baseada em Holdermann (Holdermann et al., 2014), neste cálculo são descontados os custos futuros para apresentar o valor líquido no presente. A partir dos dados de geração de energia elétrica anual, investimento inicial, tarifa atual, estimativa de aumento da tarifa de energia elétrica, degradação do sistema fotovoltaico, operação e manutenção (O&M) e vida útil de 25 anos, foram estimados os fluxos de caixa descontado para o cenário de tarifa e tributação atuais. Para análise foi considerado o valor de 7,0 R\$/Wp, degradação do sistema fotovoltaico de 0,5 % ao ano, O&M de 0,5 % ao ano, tarifa de 0,65 R\$/kWh e reajuste anual de 10 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2, 3 e 4, são apresentados os dados extraídos dos medidores bidirecionais, que são o consumo abatido pela rede (kWh) e a energia elétrica injetada na rede (kWh). A energia consumida

instantaneamente pelas unidades prosumidoras, ou seja, aquela que não foi registrada pelo medidor, pode ser calculada a partir dos dados de geração total de energia elétrica registrada pelo inversor subtraindo-se o montante de energia elétrica que foi injetada na rede. O consumo total de energia elétrica da residência, representa a quantidade de energia elétrica que deveria ser fornecida pela rede, caso não houvesse sistema de geração de energia elétrica e é a soma entre o consumo da rede e a energia elétrica que foi consumida instantaneamente.

Mês Ref.	Consumo da Rede (kWh)	Injetado (kWh)	Energia consumida inst. (kWh)	Geração Total (kWh)	Consumo sem Geração (kWh/mês)
jan-17	244,00	93,00	77,91	170,91	321,91
fev-17	214,00	87,00	75,81	162,81	289,81
mar-17	247,00	82,00	69,12	151,12	316,12
abr-17	144,00	76,00	52,89	128,89	196,89
mai-17	110,00	76,00	42,16	118,16	152,16
jun-17	123,00	54,00	24,72	78,72	147,72
jul-17	99,00	79,00	37,23	116,23	136,23
ago-17	106,00	83,00	40,26	123,26	146,26
set-17	116,00	94,00	41,21	135,21	157,21
out-17	100,00	70,00	33,67	103,67	133,67
nov-17	110,00	110,00	51,51	161,51	161,51
dez-17	118,00	92,00	48,21	140,21	166,21
Total	1731,00	996,00	594,70	1590,70	2326,00
Média	144,30	83,00	49,60	132,60	193,80
Desvio Padrão	56,50	14,10	16,90	26,90	71,90

Tabela 2: Dados de consumo e geração da residência com SFCR 1.

Mês Ref.	Consumo da Rede (kWh)	Injetado (kWh)	Energia consumida inst. (kWh)	Geração Total (kWh)	Consumo sem Geração (kWh/mês)
jan-17	144,00	156,00	94,00	250,00	238,00
fev-17	148,00	161,00	109,00	270,00	257,00
mar-17	192,00	138,00	92,00	230,00	284,00
abr-16	146,00	148,00	79,00	227,00	225,00
mai-16	167,00	112,00	66,00	178,00	233,00
jun-16	169,00	105,00	61,00	166,00	230,00
jul-16	213,00	97,00	63,00	160,00	276,00
ago-16	160,00	144,00	69,00	213,00	229,00
set-16	167,00	140,00	79,00	219,00	246,00
out-16	156,00	157,00	73,00	230,00	229,00
nov-16	124,00	193,00	77,00	270,00	201,00
dez-16	106,00	203,00	87,00	290,00	193,00
Total	1892,00	1754,00	949,00	2703,00	2841,00
Média	157,70	146,20	79,10	225,20	236,70
Desvio Padrão	28,20	32,00	14,30	41,60	26,60

Tabela 3: Dados de consumo e geração da residência com SFCR 2.

Mês Ref.	Consumo da Rede (kWh)	Injetado (kWh)	Energia consumida inst. (kWh)	Geração Total (kWh)	Consumo sem Geração (kWh/mês)
jan-17	745,00	209,00	273,28	482,28	1018,28
fev-17	625,00	224,00	211,36	435,36	836,36
mar-17	622,00	245,00	222,45	467,45	844,45
abr-17	398,00	186,00	160,91	346,91	558,91
mai-17	328,00	219,00	141,44	360,44	469,44
jun-17	410,00	118,00	93,62	211,62	503,62
jul-17	347,00	238,00	139,13	377,13	486,13
ago-17	352,00	239,00	121,98	360,98	473,98
set-17	400,00	227,00	165,26	392,26	565,26
out-17	345,00	182,00	131,71	313,71	476,71
nov-17	358,00	271,00	184,84	455,84	542,84
dez-17	346,00	237,00	181,88	418,88	527,88
Total	5276,00	2595,00	2027,86	4622,86	7304,00
Média	439,70	216,30	169,00	385,20	608,70
Desvio Padrão	140,80	39,60	49,50	75,60	183,80

Tabela 4: Dados de consumo e geração da residência com SFCR 3.

O desvio padrão dos indicadores de desempenho é mais acentuado na residência com SFCR 3, indicando maior sazonalidade, tanto no perfil de consumo como no perfil de geração de energia elétrica.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam os histogramas de energia elétrica gerada mensalmente pelos SFCRs. Para os meses de janeiro, fevereiro e março das unidades prosumidoras com os sistemas 1 e 3, o consumo elevado pode ser atribuído ao condicionamento de ar, que para a região sul do Brasil, no verão, esses equipamentos podem representar 27 % do consumo de energia elétrica em uma residência, sendo que esta participação é da ordem de apenas 3 % no período de inverno (Ghisi et al, 2007). O abatimento de consumo de energia elétrica foi de 68 %, 95 % e 63 % para os sistemas 1, 2 e 3, respectivamente.

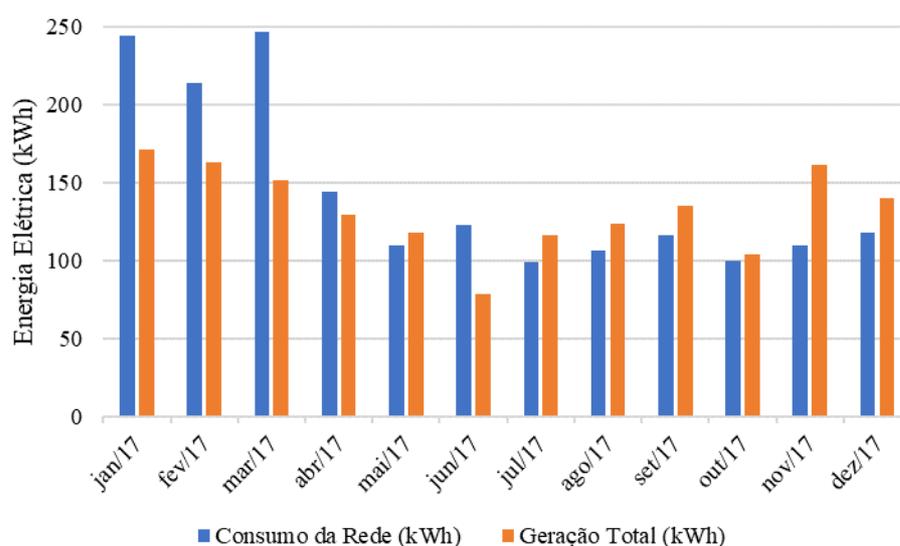


Figura 3: Consumo e geração mensal de energia elétrica, residência com Sistema 1.

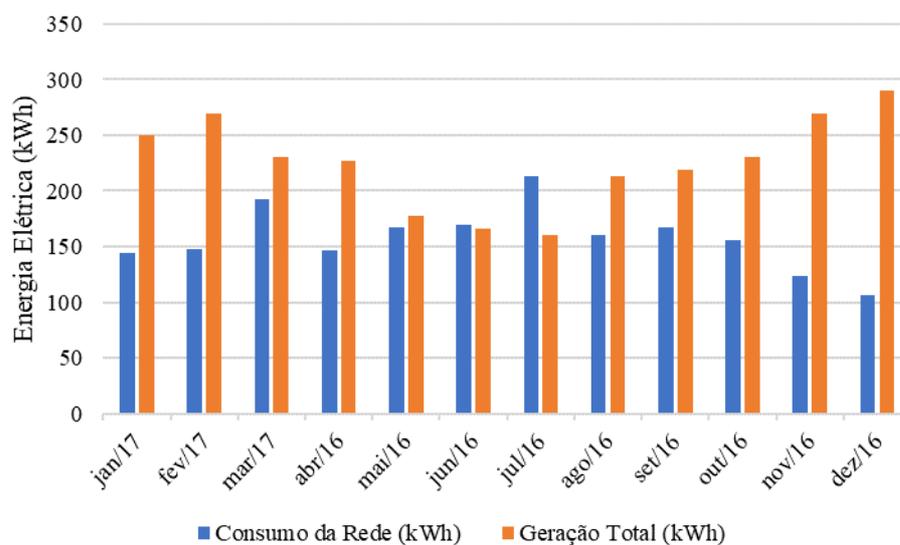


Figura 4: Consumo e geração mensal de energia elétrica, residência com Sistema 2.

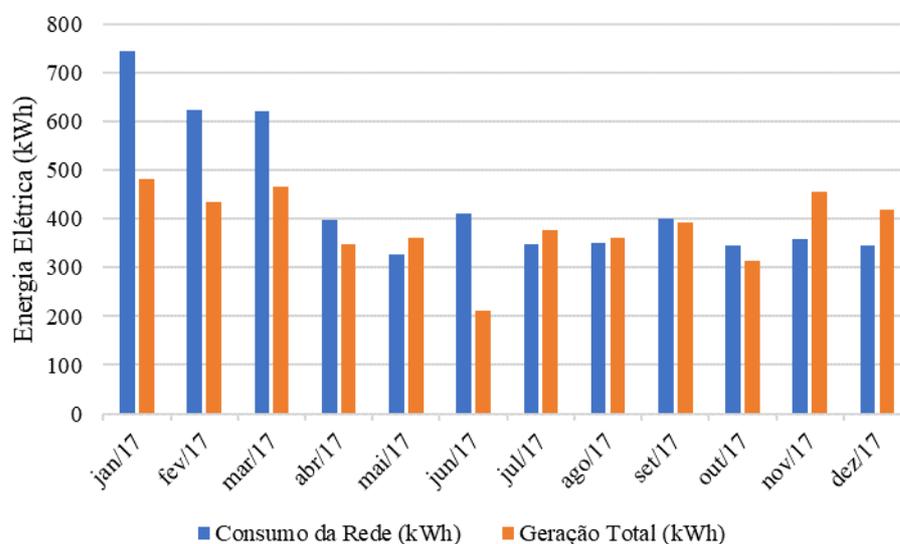


Figura 5: Consumo e geração mensal de energia elétrica, residência com Sistema 3.

A Tabela 5 apresenta índices de geração de energia elétrica e produtividade dos sistemas fotovoltaicos (FV) das unidades prossumidoras. A produtividade ou *yield final*, é a razão entre a energia elétrica gerada (kWh) por unidade de potência instalada dos sistemas (kWp) ao longo de um período, normalmente mensal ou anual. A produtividade pode apresentar variações de acordo com a tecnologia dos módulos fotovoltaicos, ângulo de orientação, ângulo de inclinação, sombreamento e sujeira (Saber et al, 2014).

A Figura 6 apresenta os índices de energia elétrica injetada na rede mensalmente para as unidades prossumidoras. Para o SFCR 3 os menores índices de injeção de energia elétrica acontecem nos meses de verão, o que indica o aumento das cargas consumindo energia elétrica durante a geração, provavelmente pelo uso de condicionadores de ar durante o dia. Para o SFCR 3 a média mensal de energia elétrica injetada na rede foi de 57 % e o desvio padrão foi de 6 %. O mesmo perfil ocorre no SFCR 1, com média de injeção de energia elétrica de 63 % e desvio padrão de 6 %. No SFCR 2 não é observado essa sazonalidade no uso dos equipamentos elétricos durante o período que ocorre a geração de energia elétrica, sendo que a média mensal de injeção foi de 65 % e o desvio padrão foi de apenas 4 %.

	SFCR 1	SFCR 2	SFCR 3
Geração FV Total (kWh)	1590,70	2703,00	4622,90
Produtividade (kWh/kWp)	1272,50	1299,50	1246,10
Média Mensal de Geração (kWh)	132,50	225,20	385,20
Desvio Padrão Mensal (kWh)	26,80	41,60	75,60

Tabela 5: Índices de geração de energia elétrica e produtividade anuais dos sistemas fotovoltaicos.

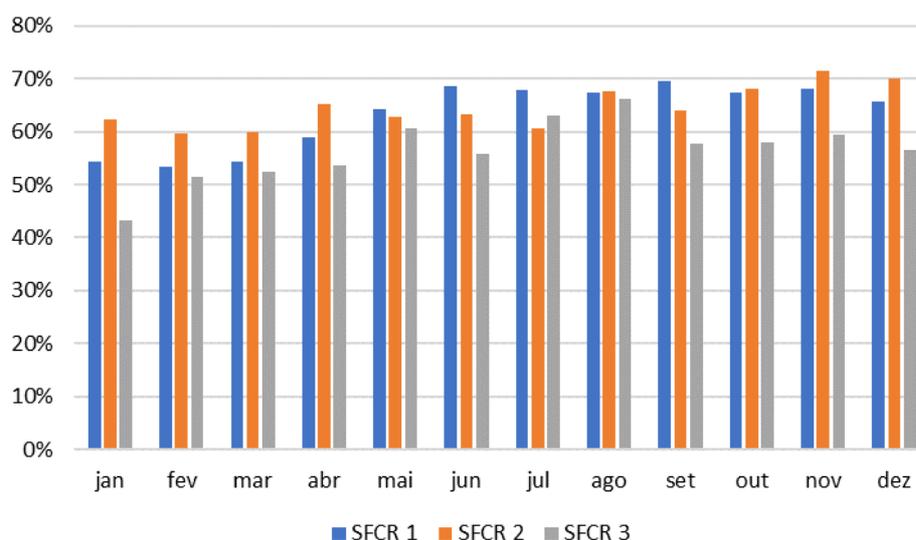


Figura 6: Perfil de injeção de energia elétrica mensal das unidades prosumidoras.

Os índices de injeção de energia elétrica e consumo instantâneo anuais podem ser observados na Figura 7. Este perfil com injeções de energia elétrica acima de 50 % da energia total gerada é bastante característico de residências familiares, onde provavelmente todos os moradores passem boa parte do dia fora de casa (Scarabelot et al., 2018). O número de pessoas em uma residência não tem impacto significativo no consumo, mas sim o nível de ocupação, ou seja, quanto tempo as pessoas permanecem na residência (Wallis et al, 2016).

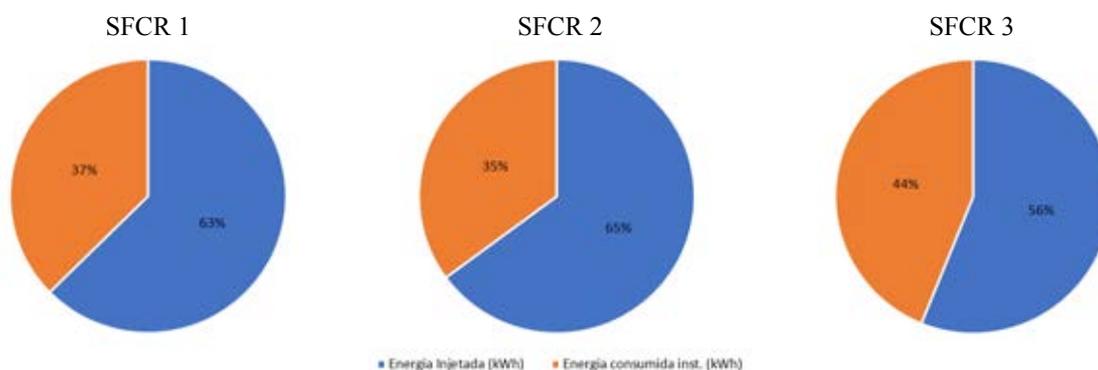


Figura 7: Perfil de consumo das unidades prosumidoras.

Segundo (Silva et al., 2014) os picos de consumo ocorrem ao meio dia, pelo uso da cozinha e as 7:00 h e 19:00 h pelo uso do chuveiro elétrico, esses equipamentos representam a maior potência presente em uma residência, predominando o consumo em horários em que não há geração de energia elétrica a

partir do sistema fotovoltaico. No restante do tempo a residência apresenta consumo somente de equipamentos em modo de espera, fazendo com que grande parte da energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico seja injetada na rede da concessionária (Scarabelot et al., 2018). Verifica-se que há um perfil bem caracterizado de geração de energia elétrica e consumo de energia elétrica.

A Figura 8 apresenta o fluxo de caixa descontado para os investimentos aplicados nos sistemas fotovoltaicos, considerando os valores à vista. O fluxo de caixa descontado considera a taxa de desconto anual que é o valor economizado nas faturas de energia elétrica, apresentando um resultado confiável para longos períodos de análise. As considerações sobre os indicadores econômicos foram definidas na seção de materiais e métodos descrita anteriormente.

O retorno de investimento dos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em unidades prosumidoras residenciais foi de 79 meses, 78 meses e 81 meses, para SFCR 1, SFCR 2 e SFCR 3, respectivamente. Mostra-se a viabilidade do investimento para todas as unidades prosumidoras, visto que os fabricantes dos módulos fotovoltaicos estimam vida útil de 30 anos, dessa forma a unidade prosumidora após atingir o retorno financeiro ainda teria mais de 23 anos de benefício com a redução dos valores mensais de suas faturas.

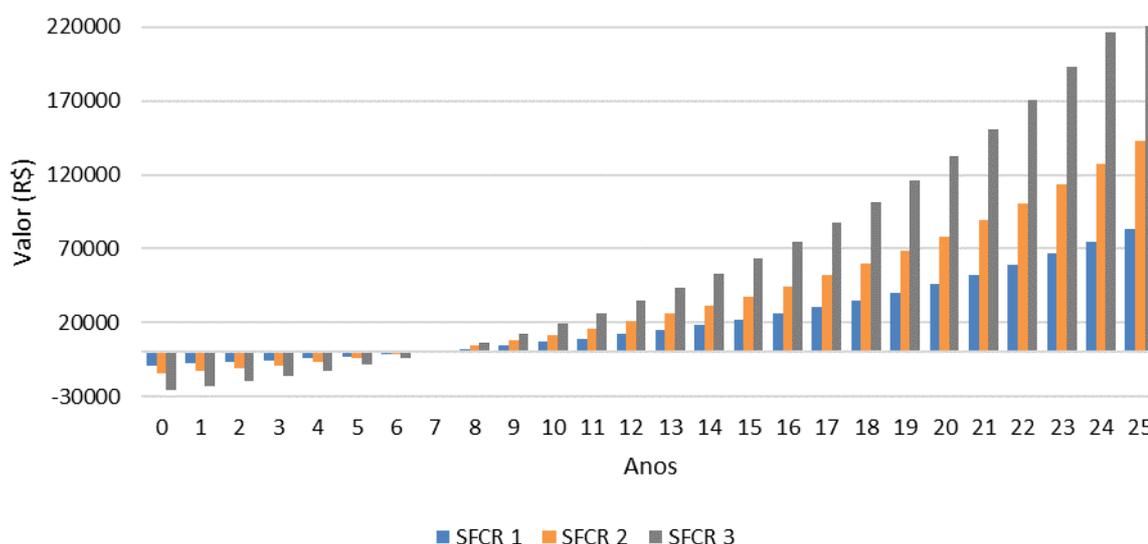


Figura 8: Fluxo de caixa descontado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação energética de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em operação instalados em unidades prosumidoras residenciais localizadas nas cidades de Turvo e Criciúma, sul do Brasil. Também foram calculados os retornos de investimento para cada sistema. Foram apresentadas as variações de geração de energia elétrica mensal, verificando-se maior produtividade no SFCR 2 de 1299,5 kWh/kWp.

O abatimento de consumo das unidades prosumidoras ficou entre 63 e 95 % enquanto que a energia elétrica que é injetada na rede representou uma fração variável entre 56 % e 65 % da energia elétrica gerada pelos sistemas fotovoltaicos, o perfil de consumo de unidades prosumidoras residenciais

mostra que grande parte da energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico é injetada na rede da concessionária.

O retorno de investimento para os sistemas fotovoltaicos, considerando investimento à vista, foi de aproximadamente 6 anos e 7 meses. Dessa forma os sistemas fotovoltaicos devem ser aplicados de maneira adequada em relação a viabilidade técnica, custo do investimento e tarifa para que seja possível a rentabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. (2012). Micro e Minigeração Distribuída (REN 482/2012) - ANEEL.
- ANEEL. (2015). National Electric Energy Agency Normative (ANEEL), Rio de Janeiro, Brazil. Resolution No. 687/2015.
- ANEEL. (2017). National Electric Energy Agency Normative (ANEEL), Rio de Janeiro, Brazil. Consumer Units With Distributed Generation. Recuperado de http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Classe.asp.
- Breyer, C., & Gerlach, A. (2013). Global overview on grid-parity. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 121–136. Recuperado de <http://doi.wiley.com/10.1002/pip.1254>
- Darghouth, N. R., Barbose, G., & Wiser, R. (2011). The impact of rate design and net metering on the bill savings from distributed PV for residential customers in California. *Energy Policy*, 39(9), 5243–5253.
- Davi, G. A., Caamano-Martin, E., Ruther, R., & Solano, J. (2016). Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil. *Energy and Buildings*, 120, 19–29.
- Eid, C., Reneses Guillén, J., Frías Marín, P., & Hakvoort, R. (2014). The economic effect of electricity net-metering with solar PV: Consequences for network cost recovery, cross subsidies and policy objectives. *Energy Policy*, 75, 244–254. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421514005023>
- Ghisi, E., Gosch, S., & Lamberts, R. (2007). Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. *Energy Policy*, 35(8), 4107–4120. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421507000559>
- Holdermann, C., Kissel, J., & Beigel, J. (2014). Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy*, 67, 612–617. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513011944>
- Islam, M., Mekhilef, S., & Hasan, M. (2015). Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 69–86. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.009>
- Lacchini, C., & Rüter, R. (2015). The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. *Renewable Energy*, 83, 786–798. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.045>
- Saber, E. M., Lee, S. E., Manthapuri, S., Yi, W., & Deb, C. (2014). PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings. *Energy*, 71, 588–595. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214005477>
- Scarabelot, L. T., Rampinelli, G. A., & Rambo, C. R. (2018). Avaliação do sistema de compensação de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos em unidades prosumidoras residenciais. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018*, 0. Recuperado de <http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/193>
- Silva, A. S., Luiz, F., Mansur, A. C., Vieira, A. S., Schaefer, A., & Ghisi, E. (2014). Knowing electricity end-uses to successfully promote energy efficiency in buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 2(0), 7–18. Recuperado de <https://journals.aau.dk/index.php/sepm/article/view/265>
- Villareal, M. J. C., & Moreira, J. M. L. (2016). Household consumption of electricity in Brazil between 1985 and 2013. *Energy Policy*, 96, 251–259. <http://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2016.04.030>

Wallis, H., Nachreiner, M., & Matthies, E. (2016). Adolescents and electricity consumption; Investigating sociodemographic, economic, and behavioural influences on electricity consumption in households. *Energy Policy*, 94, 224–234. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421516301501>

ABSTRACT: This paper presents the analysis of net metering of photovoltaic systems in residential prosumers. The analysis is performed from measured data. For the study are considered economic aspects and profiles of electric energy injected into the grid. Photovoltaic systems are 1.25 kW_p, 2.08 kW_p and 3.71 kW_p. The yield final was 1272.6 kWh/kW_p, 1299.5 kWh/kW_p and 1246.1 kWh/kW_p. The electric energy that is injected into the grid represents a fraction of 63 %, 65 % and 56 % of the electric energy generated. The reduction in electricity consumption was 68 %, 95 % and 63 %. The payback time was approximately 6 years and 7 months.

Keywords: solar energy, distributed generation, prosumer, net metering.

PREDICCIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA CON TÉCNICAS DE APRENDIZAJE SUPERVISADO

Walter Herrera Martínez¹, Analía Moreno², Ana Clara Reybet¹, Simón Saint-André²

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

²Agencia Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (INN), CNEA – CONICET

Departamento Energía Solar, Gerencia Investigación y Aplicaciones,

Centro Atómico Constituyentes, CNEA

Av. General Paz 1499 (1650), San Martín, Buenos Aires, Argentina. Tel. (011) 6772-7199

e-mail: herreram@tandar.cnea.gov.ar

Recibido 13/08/18, aceptado 21/09/18

RESUMEN: En el siguiente trabajo se realizó la predicción de la potencia generada por un conjunto de módulos fotovoltaicos ubicado en el edificio 42 del Centro Atómico Constituyentes (CAC) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Se efectuó un preprocesamiento de tres años de datos de generación recolectados del inversor fotovoltaico, y posteriormente se determinó a partir de diferentes métodos de aprendizaje supervisado y su análisis, que el método con el algoritmo de *Random Forest* presentó el comportamiento más adecuado para realizar una predicción respecto a los datos de generación fotovoltaica reales. Una vez elegido el método de aprendizaje, se optimizaron los parámetros y se analizaron qué variables características son las más influyentes en los resultados. Finalmente se obtuvo la energía producida por el conjunto de módulos a partir de la generación predicha y se comparó con los datos reales, obteniendo coeficientes de determinación mayores a 0,9.

Palabras clave: Energía solar, generación, aprendizaje supervisado, *Random Forest*.

INTRODUCCION

En las centrales generadoras de energía convencional se utilizan recursos como carbón, gas natural, petróleo, entre otras, que se encuentran asociados con la emisión de gases de efecto invernadero, en especial CO₂ (Yeboah et al., 2015). En los últimos años el cambio climático y la crisis energética han motivado al uso racional de la energía, como también al desarrollo, investigación e implementación de energías renovables. Debido al abundante recurso solar existente en nuestro país, la energía solar fotovoltaica es una de las más prometedoras para la generación energética.

Uno de los principales desafíos a resolver es la variabilidad que se presenta en la generación fotovoltaica. Las fuentes energéticas convencionales, a excepción de cuando presentan fallas técnicas, poseen una generación eléctrica que se puede predecir fácilmente. Sin embargo, la energía solar fotovoltaica, como la mayoría de las energías renovables, presenta una amplia variación con las condiciones meteorológicas, lo que dificulta su predicción. La predicción de la producción renovable puede ser útil para estimar las reservas, programar el sistema de energía, gestionar la congestión en las redes de transmisión, coordinar el almacenamiento o comerciar en los mercados eléctricos. En las últimas décadas se ha investigado y desarrollado modelos para predecir la radiación solar, pero existen pocos desarrollos para evaluar la potencia generada por sistemas fotovoltaicos. Para asegurar una incorporación rentable y económica de energía solar fotovoltaica, la predicción de potencia de sistemas fotovoltaicos se ha convertido en un elemento crítico de la gestión de los sistemas energéticos (Bella Espinar et al, 2010). La motivación para realizar este trabajo fue predecir la potencia generada de una instalación a partir de variables meteorológicas, utilizando técnicas de aprendizaje automático.

Las técnicas de aprendizaje automático son adecuadas para predecir sistemas complejos, especialmente cuando se utilizan grandes cantidades de datos. Los métodos detectan automáticamente patrones en los datos y luego usan los patrones encontrados para predecir los datos futuros. Estas técnicas pueden ser categorizadas en dos grupos: técnicas supervisadas y técnicas no supervisadas. Las técnicas de aprendizaje automático supervisado (*Supervised Machine Learning: SML*) son utilizadas en los modelos predictivos donde los atributos o variables de entradas tienen asociadas variables de salida o respuesta. Si la variable de salida o respuesta es categórica (por ejemplo: si/no, hombre/mujer, etc.) entonces es un problema de clasificación. Cuando la variable de salida es continua entonces se trata de un problema de regresión. Por otro lado, las técnicas de aprendizaje automático no supervisado (*UnSupervised Machine Learning: USML*) son utilizadas para información o descubrimiento de conocimiento (Yeboah et al., 2015).

El foco del siguiente estudio se basa en las técnicas *SML*. Existen varios métodos para resolver problemas de *SML*, como redes neuronales (*Artificial Neural Networks: ANN*), máquinas de vectores de soporte (*Support Vector Machines: SVM*) y métodos de ensamble (*Ensemble methods: ME*) que incluye el método *Random Forest (RF)* tanto la clasificación como la regresión. En este caso, la variable de salida, la potencia generada, es continua y por lo tanto, se trata de un problema de regresión. Para realizar las predicciones necesarias se utilizó el método *RF*, debido a que los métodos tradicionales como la regresión lineal no son lo suficientemente robustos para manipular la complejidad y la no linealidad de los valores predichos involucrados en el modelado de la potencia solar (Yeboah et al., 2015).

RF es un algoritmo que se basa en la formación de bosques como conjuntos de árboles de decisión. Los mismos son generados, en la mayoría de los casos, con el método de “*bagging*”. Este método combina varios modelos de aprendizaje para encontrar el óptimo. En conclusión, *RF* construye múltiples árboles de decisión y los combina para obtener una predicción más precisa y estable. Una de las ventajas que tiene utilizar este algoritmo es que agrega aleatoriedad adicional al modelo, mientras crecen los árboles. En lugar de buscar la característica más importante mientras se divide un nodo, busca la mejor característica entre un subconjunto aleatorio de características. Esto da como resultado una amplia diversidad que generalmente devuelve un mejor modelo (Breiman, 2001).

RF se considera un algoritmo muy útil y fácil de usar, porque los hiperparámetros predeterminados a menudo producen un buen resultado de predicción. Uno de los grandes problemas en el aprendizaje supervisado es el sobreajuste, lo que no sucede tan fácilmente con el algoritmo *RF*, debido a que, si hay suficientes árboles en el bosque, el clasificador no sobreajustará el modelo. La principal limitación de *RF* es que una gran cantidad de árboles puede hacer que el algoritmo sea lento e ineficaz para las predicciones en tiempo real. En general, estos algoritmos son rápidos de entrenar, pero bastante lentos para crear predicciones una vez que están entrenados (Svetnik, 2003).

El objetivo del trabajo es poder predecir la potencia generada por una instalación fotovoltaica a partir de variables meteorológicas como temperatura, humedad, radiación y nubosidad, por un método de aprendizaje supervisado y demostrar que el algoritmo de *RF* es aquel que mejor ajusta el modelo.

DATOS UTILIZADOS

La instalación fotovoltaica donde se registraron los datos de generación utilizados para este trabajo está compuesta por 23 paneles solares de silicio policristalino y Tedlar transparente, marca Brandoni de 215 Wp cada uno, inclinados 34° con respecto a la horizontal y con orientación 20° al Este del Norte (aproximadamente NNE). Estos paneles están instalados en una pérgola en el tercer piso del edificio 42 del CAC de CNEA (Eyras, Durán, 2013). El inversor conectado a dicha instalación es de 4,6 kW, marca AEG modelos Protect PV 4600. El mismo cuenta con una interfaz de comunicación serie RS232 y el fabricante proporciona el

software propietario PV MONITOR para monitorear el estado de múltiples inversores, además permite definir el intervalo de muestreo y exportar los datos adquiridos.



Figura 1: Instalación fotovoltaica.



Figura 2: Inversor AEG.

Las mediciones de radiación solar fueron obtenidas de un piranómetro CMP21 calidad Level 1.0 de la red AERONET (*Aerosol Robotic Network, NASA*) instrumento instalado en el CEILAP (CITEFA - CONICET), Villa Martelli, Buenos Aires. Los datos de temperatura, humedad relativa y nubosidad total para los tres años estudiados fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la estación Villa Ortúzar, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

METODOLOGIA

Para el análisis, limpieza, procesamiento y transformación de los datos en este trabajo se ha elegido como lenguaje de programación de código abierto Python v.3.6.4. Se aprovecharon las facilidades que brinda la librería *sklearn* (<http://scikit-learn.org/stable/index.html>) para aplicar métodos de aprendizaje supervisado.

Inicialmente se realizó un preprocesamiento de los datos, debido a que estos no fueron proporcionados por las mismas fuentes, se igualaron intervalos de muestreo en las mediciones y se realizaron las conversiones de unidades correspondientes. Para realizar la limpieza de datos se tuvo en cuenta que el inversor entra en modo de espera cuando la generación está por debajo de un límite (100 VDC), también se consideraron fallas técnicas informadas que produjeron la desconexión de los equipos, tanto en el inversor como en el piranómetro. Inicialmente el criterio que se adoptó para descartar un día completo fue tener 8 horas sin generación.

Para realizar el entrenamiento de los datos se utilizaron dos métodos: Regresión lineal y *Random Forest*, un importante aspecto a tener en cuenta es que los árboles permiten mejores predicciones con variables que se encuentran poco correlacionadas entre sí. En los modelos se

utilizan hiperparámetros y parámetros, los primeros son una configuración externa al modelo y su valor no puede ser estimado de los datos; en contraste los parámetros son internos al modelo y su valor se obtiene de los datos procesados. Se realizaron ambos métodos con el objetivo de comparar y demostrar cómo aumenta el coeficiente de determinación utilizando un algoritmo más complejo y confiable como es *RF*. El coeficiente de determinación indica la proporción de la variación total que está siendo explicada por la regresión, además ofrece una idea de la calidad del ajuste del modelo a los datos. Los hiperparámetros en *RF* se usan para aumentar el poder predictivo del modelo o para hacer que el modelo sea más rápido. Dentro de los más importantes está el hiperparámetro "*n_estimators*", que es el número de árboles que construye el algoritmo, en general una mayor cantidad de árboles aumenta el rendimiento y hace que las predicciones sean más estables, pero también ralentiza el cálculo. Otro hiperparámetro importante es "*max_depth*", que se refiere a la máxima profundidad del árbol, la variación del mismo permitiría optimizar el modelo.

Inicialmente se analizó la variación de las predicciones mediante regresión lineal y *RF*, utilizando como característica de entrenamiento sólo la variable radiación global. Luego se agregaron a los datos de entrenamiento las variables meteorológicas y temporales como humedad relativa, nubosidad total, temperatura, mes del año y hora del día, con el fin de estimar su influencia en la generación de energía.

Una vez obtenido el modelo óptimo para predecir los datos de potencia generada se procedió al cálculo de la energía producida utilizando la ecuación 1:

$$E(t) = \int_a^b P(t)dt \quad (1)$$

Para comparar con los datos proporcionados por el inversor se establecen los límites de integración para cada día. Se resolvió la integral empleando el método de los trapecios que aproxima la ecuación (1) con la siguiente ecuación 2 (Larson, 2006):

$$\int_a^b P(t)dt \sim \frac{b-a}{n} \left[\frac{P(a)+P(b)}{2} + \sum_{k=1}^{n-2} a + k \frac{b-a}{n} \right] \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se llevaron a cabo las predicciones de la potencia generada con las dos técnicas de regresión antes descritas (Regresión lineal y *Random Forest*) modificando las variables de entrenamiento, los coeficientes de determinación (R^2) que se obtuvieron en cada uno de los modelos simulados se muestran en la tabla 1:

	Radiación global	Radiación global + Variables características
Regresión lineal	0,694	0,764
<i>Random Forest</i>	0,557	0,869

Tabla 1: Métodos de predicción utilizados y valores de R^2 para cada uno de ellos.

A partir de estos resultados se eligió utilizar como método de predicción *RF* y considerar todas las variables de entrenamiento: radiación global total, variables meteorológicas y temporales, ya que presenta el máximo R^2 de los casos analizados.

Como se mencionó anteriormente, en el algoritmo de *RF* existen parámetros variables para maximizar la eficiencia del método. En la Figura 3 se observa el aumento de R^2 al variar la cantidad de árboles ($n_estimators$) y la profundidad de los árboles (max_depth). El resultado de este estudio permite conocer cuáles son los hiperparámetros óptimos para realizar la predicción con los datos utilizados para este trabajo.

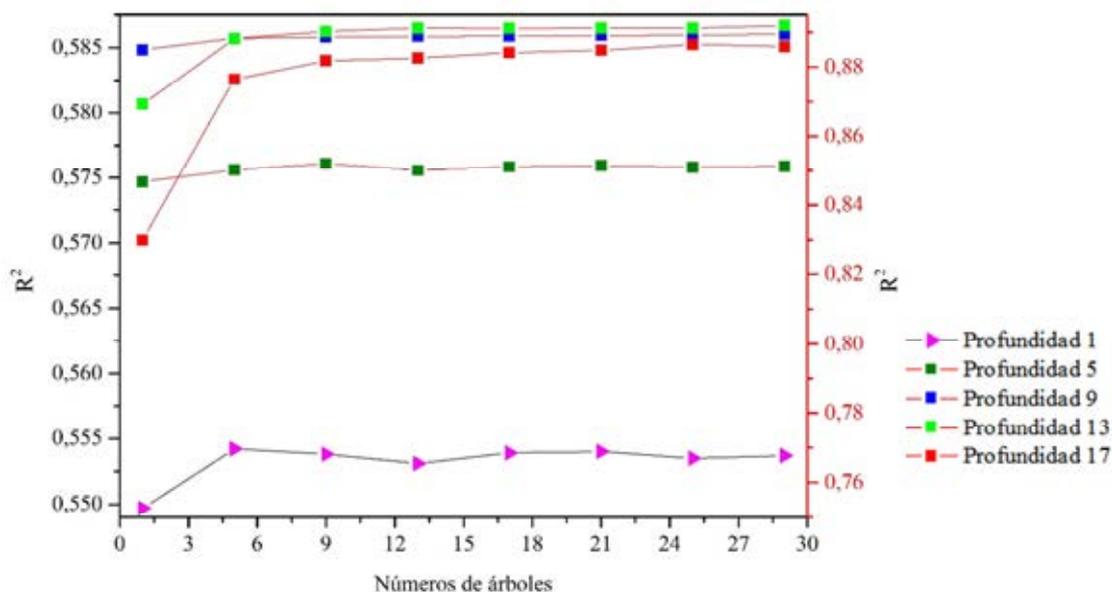


Figura 3: Optimización de hiperparámetros para el método *RF* y su correspondiente valor de R^2 . El eje de la izquierda solo corresponde a los datos de profundidad 1.

	Profundidad 1	Profundidad 5	Profundidad 9	Profundidad 13	Profundidad 17
Nº de árboles 1	0,5497	0,8468	0,8850	0,8693	0,8300
Nº de árboles 15	0,5542	0,8502	0,8882	0,8882	0,8765
Nº de árboles 19	0,5538	0,8520	0,8886	0,8902	0,8818
Nº de árboles 13	0,5531	0,8501	0,8888	0,8912	0,8826
Nº de árboles 17	0,5539	0,8511	0,8889	0,8911	0,8842
Nº de árboles 21	0,5540	0,8514	0,8890	0,8912	0,8848
Nº de árboles 25	0,5535	0,8510	0,8891	0,8912	0,8865

Tabla 2: Optimización de hiperparámetros para el método *RF* y su correspondiente valor de R^2 .

Aumentar el número de árboles y su profundidad es sinónimo de más espacio computacional y tiempo de procesamiento, por esto es importante encontrar los valores óptimos de los hiperparámetros de modo que se maximice el valor de R^2 . A partir de la Tabla 2 se puede inferir que el ajuste más favorable fue aquel cuyos parámetros eran 13 árboles y una profundidad de 13, lo que proporcionó un R^2 de 0,8912, demostrando una alta calidad del modelo de ajuste.

Un aspecto importante en la evaluación del método escogido fue determinar la influencia de cada variable en el modelo (Figura 4), se debe tener en cuenta que la influencia de las variables

depende del algoritmo utilizado y se refiere a cuáles variables tuvieron mayor influencia para la predicción obtenida en base a los datos usados en este trabajo.

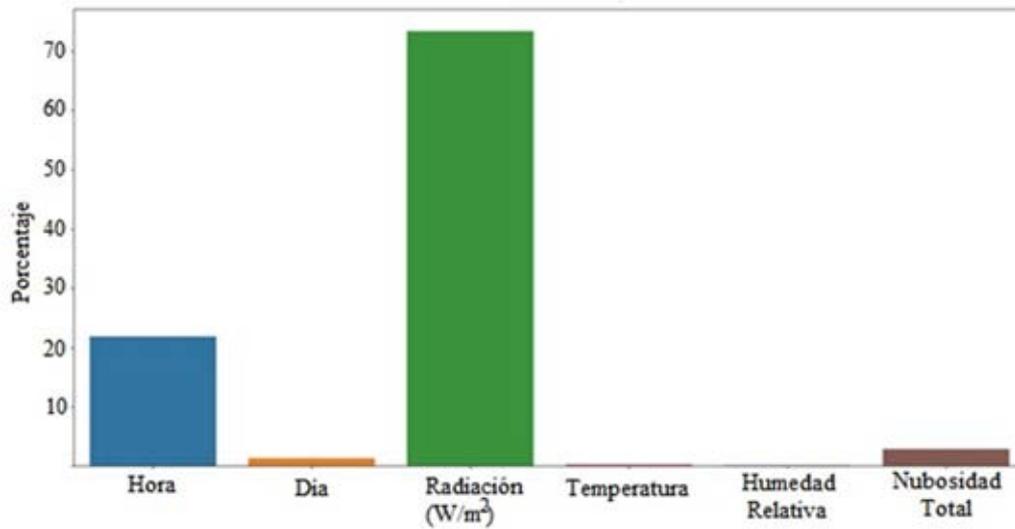


Figura 4: Influencia de cada variable en el modelo empleado.

En la Figura 4 se observa que la variable radiación solar global es la que más influye en la predicción de la generación, algo que era esperable. Sin embargo, la temperatura y humedad relativa son dos variables casi sin efecto en esta predicción, este es un punto que se podría estudiar y analizar en trabajos futuros donde se comparen otros métodos de aprendizaje.

En las Figuras 5 y 6 se presentan resultados de la predicción contrastados con los datos originales en un día soleado y un día con gran nubosidad, respectivamente. Estas gráficas ilustran la capacidad que presenta el modelo para predecir la potencia generada con las variables de entrenamiento consideradas.

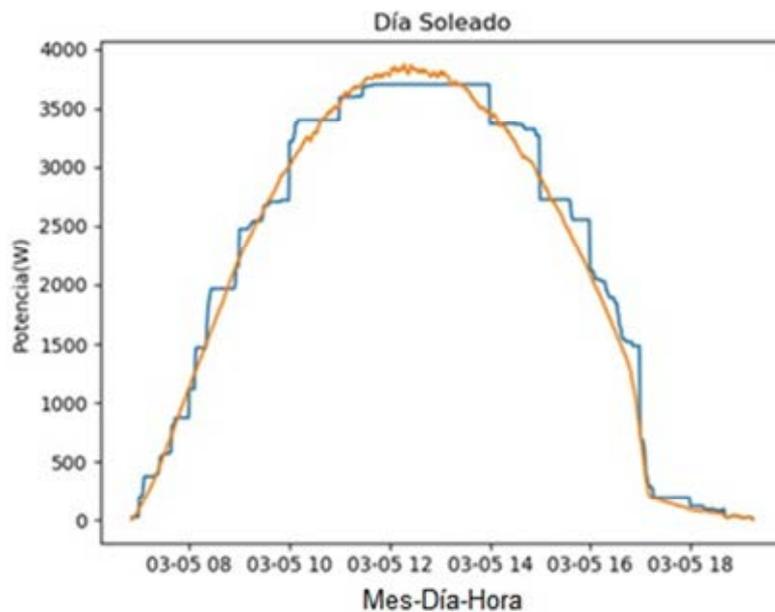


Figura 5. Potencia generada y predicción para un día soleado.

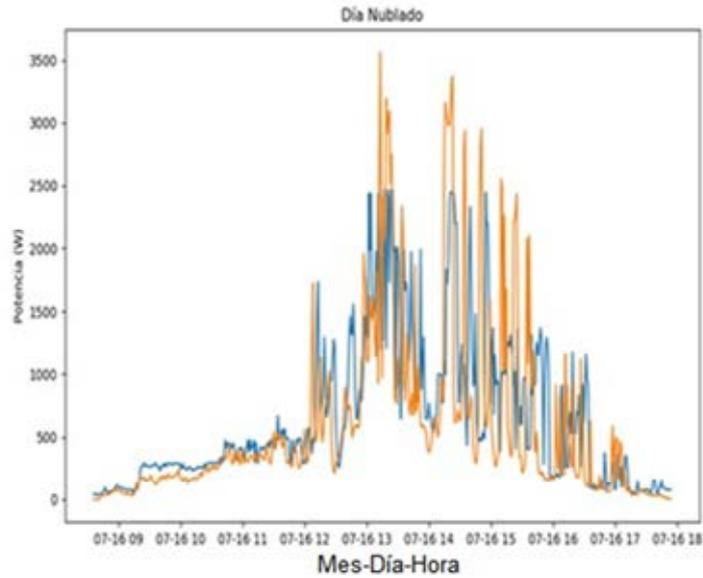
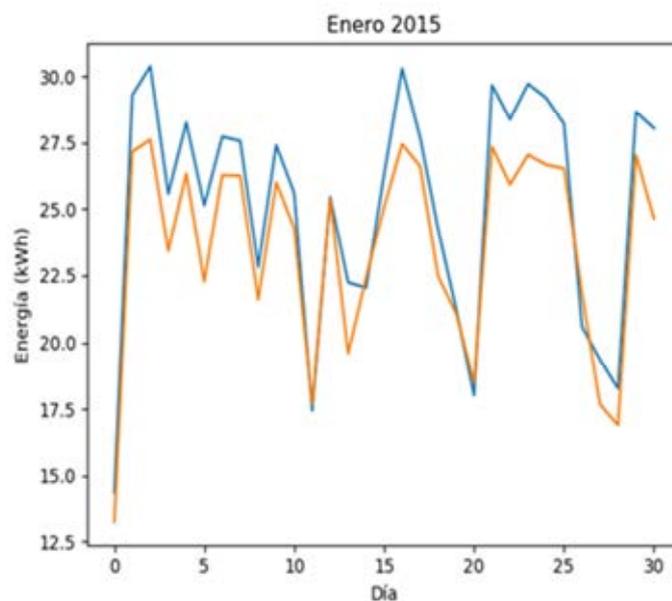


Figura 6. Potencia generada y predicción para día nublado.

Las figuras anteriores, muestran cómo el modelo predicho tiene un comportamiento similar al presentado por los datos reales, las mayores diferencias se encuentran en los mínimos de potencia generada que corresponden a momentos nublados del día, esta diferencia se relaciona con la dificultad que presenta el predecir la nubosidad instantánea.

Por último, se procedió al cálculo de la energía generada con los datos predichos y se comparó con los datos energéticos que entrega el inversor. Para ello se realizó la integral numérica diaria utilizando el método del trapecio como se describió anteriormente; se consideró únicamente los datos que se encontraban equiespaciados y los días que presentaban más del 5% de los valores totales diarios. A modo ilustrativo se presenta la gráfica del mes enero de 2015 (Figura 7). En adición, en la Figura 8 se presenta la correlación existente entre la energía calculada y la energía que es medida por el inversor, en la cual se observó una correlación entre los valores calculados a partir de los datos predichos y los datos reales. Esta correlación presentó un coeficiente de



determinación de 0,935.

Figura 7. Energía medida por el inversor (curva azul) y calculada (curva naranja) para el mes de enero de 2015.

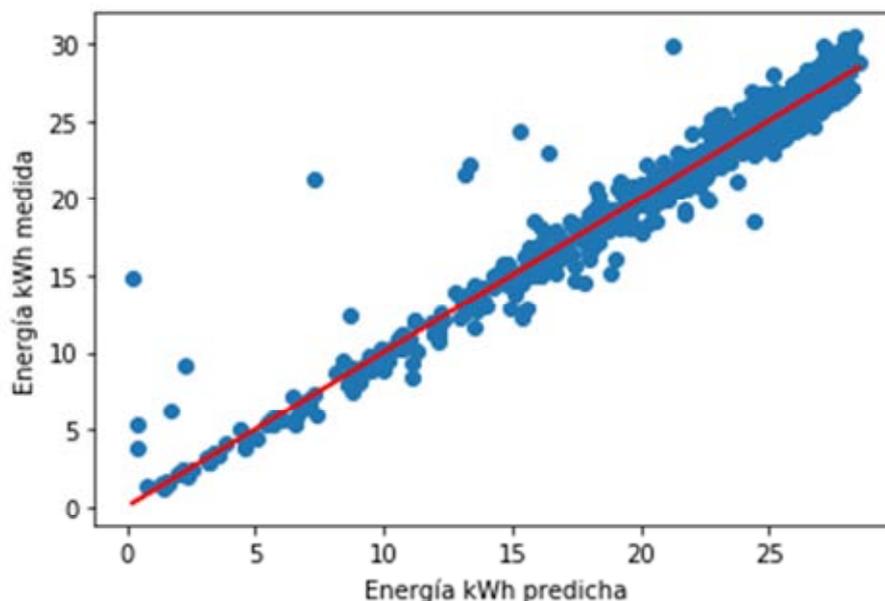


Figura 8. Correlación entre la energía medida por el inversor y la energía calculada.

CONCLUSIONES

La generación fotovoltaica depende de factores complejos para su predicción, por esa razón los métodos tradicionales de modelado, como regresión lineal, no conducen a resultados apropiados. Otros métodos, como *RF*, demuestran ser más adecuados para modelar sistemas con dichas características.

La predicción de potencia generada se realizó utilizando *RF* con todas las variables de entrenamiento meteorológicas y temporales obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,892 con los valores de los hiperparámetros optimizados. Se encontró que al realizar la predicción para días muy nublados, esta no era tan buena, debido a la falta de datos instantáneos de nubosidad.

Se puede concluir, además, como era de esperarse, la potencia generada se ve en gran medida relacionada con la radiación global y en menor medida con las demás variables que se utilizaron para el aprendizaje. Esto conduce a pensar que se podrían estudiar casos futuros de predicción tanto de generación sólo con variables meteorológicas como humedad, nubosidad y temperatura.

La comparación entre la energía generada real vs la energía calculada mostró un comportamiento lineal, con un R^2 de 0,935. Esto indicara que la predicción de la potencia nos permitió obtener valores de energía con gran precisión. Se pretende en el futuro explorar otras técnicas más complejas como redes neuronales o máquinas de vectores de soporte para realizar predicciones de generación fotovoltaica.

Finalmente, en base a este trabajo se podría predecir aproximadamente las pérdidas energéticas debido a fallas de desconexión del inversor.

REFERENCIAS

Bella Espinar, José-Luis Aznarte, Robin Girard, Alfred Mbairadjim Moussa, Georges Kariniotakis. (2010). Photovoltaic Forecasting: A state of the art. 5th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, (pp. 250-255). Tarragona, Spain.

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, (pp. 5-32).

Eyras, R. D. (2013). Proyecto Iresud:" Interconexión De Sistemas Fotovoltaicos A La Red Eléctrica En Ambientes Urbanos. In Primer Encuentro Lationamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía.

Larson, R. H. (2006). Cálculo I. Octava edición. Ed. McGraw-Hill.

Svetnik, V. L. (2003). Random forest: a classification and regression tool for compound classification and QSAR modeling. Journal of chemical information and computer sciences, (p. 1).

Yeboah, Frank & Pyle, Robert & Bock Hyeng, Christian. (2015). Predicting Solar Radiation for Renewable Energy Technologies - A Random Forest Approach. International Journal of Modern Engineering, 100-107.

ABSTRACT

In this work was carried out the power prediction generated by a set of photovoltaic modules located in 42's Constituyentes Atomic Center (CAC) building of the National Atomic Energy Commission (CNEA). A preprocessing of three years of photovoltaic generation data, collected from the inverter to which the modules are connected, was conducted. Later it was determined that the method with the Random Forest algorithm presented the most suitable behavior to make a prediction regarding the real photovoltaic generation data. After choosing the learning method, parameters were optimized and analyzed to determine which characteristic variables are the most influential in the results. Finally, the energy produced by the modules was obtained from the predicted generation and it was compared with the real data, obtaining coefficients of determination greater than 0.9.

Keywords: Solar energy, generation, machine learning, Random Forest.

POSIBLE APOORTE DE LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA AL PROBLEMA ENERGÉTICO EN COMUNIDADES AISADAS DE LA PATAGONIA CASO DE ESTUDIO: COMUNA DE TELSEN - CHUBUT

A. Kräutner, E. M. Godfrin, J.C. Durán

Departamento Energía Solar, Centro Atómico Constituyentes, CNEA
(B1650) San Martín, Provincia de Buenos Aires - Argentina
+54 11 67727132 duran@tandar.cnea.gov.ar

Recibido 18/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: La meseta central patagónica presenta numerosas poblaciones dispersas alejadas de las líneas eléctricas del sistema interconectado nacional y cuyo suministro eléctrico proviene de generadores diésel. Este trabajo muestra el potencial de la generación fotovoltaica para paliar el problema energético de dichas comunidades. A tal fin, se estimó la producción anual de una planta fotovoltaica de 100 kW en Telsen (Chubut), obteniéndose que la misma generaría aproximadamente el 5 % del consumo anual. La evaluación económico-financiera muestra que el período de retorno de la inversión resulta inferior a 5 años. Se concluye entonces que la introducción de la generación fotovoltaica en la matriz energética de las comunas aisladas contribuiría a aumentar la resiliencia del sistema eléctrico ante la escasez de combustible y a bajar los costos de generación. Ello permite afirmar que un proyecto como el propuesto es replicable en otras comunas de la Patagonia con importantes beneficios sociales y económicos.

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, generación distribuida, sistemas híbridos, microrredes.

INTRODUCCIÓN

En la meseta patagónica la energía solar fotovoltaica (FV) ha sido sistemáticamente relegada por la energía eólica sin considerar sus beneficios en términos de previsibilidad (Forbes et al., 2016) y la existencia en la región de recursos solares apropiados, comparables a los existentes en diferentes regiones de la Argentina ubicadas en la zona central o incluso en la zona norte del país.

La meseta central patagónica, contenida principalmente en las provincias de Chubut y Río Negro, presenta numerosas poblaciones dispersas, de entre 100 y 2000 habitantes, en condiciones de aislamiento respecto de las líneas eléctricas de media o alta tensión y carentes de rutas de acceso asfaltadas. En épocas invernales y estivales es común escuchar en “El Mensajero Rural”, programa radial chubutense, sobre el desabastecimiento del combustible necesario para el funcionamiento de los generadores que alimentan dichas poblaciones. La Figura 1 muestra el Sistema de Información Geográfica (SIG, 2018), donde se observa la existencia de amplias zonas de la provincia del Chubut alejadas de los puntos de generación y de las líneas de media y alta tensión.

Las usinas eléctricas de la provincia son operadas en su mayoría por cooperativas eléctricas. De las 31 cooperativas que nuclea la Federación de Cooperativas Eléctricas del Chubut, unas 18 corresponden a poblaciones aisladas, en las cuales habita aproximadamente el 2,6 % de la población de la provincia, sin considerar las numerosas aldeas escolares que disponen de grupos electrógenos cuyo funcionamiento se restringe a determinadas franjas horarias. Según datos aportados por la Dirección General de Servicios Públicos, las 18 usinas consideradas consumieron en el año 2017 un total de 10,6 millones de litros de diésel para generar unos 27.000 MWh de energía eléctrica. Considerando el precio del diésel en surtidor en Comodoro Rivadavia o Plaza Huinca más el transporte, resulta un costo de la energía eléctrica superior a 350 USD/MWh, valor muy por encima del costo medio de generación de la matriz eléctrica argentina, cercano a 70 USD/MWh (CAMMESA, 2018).

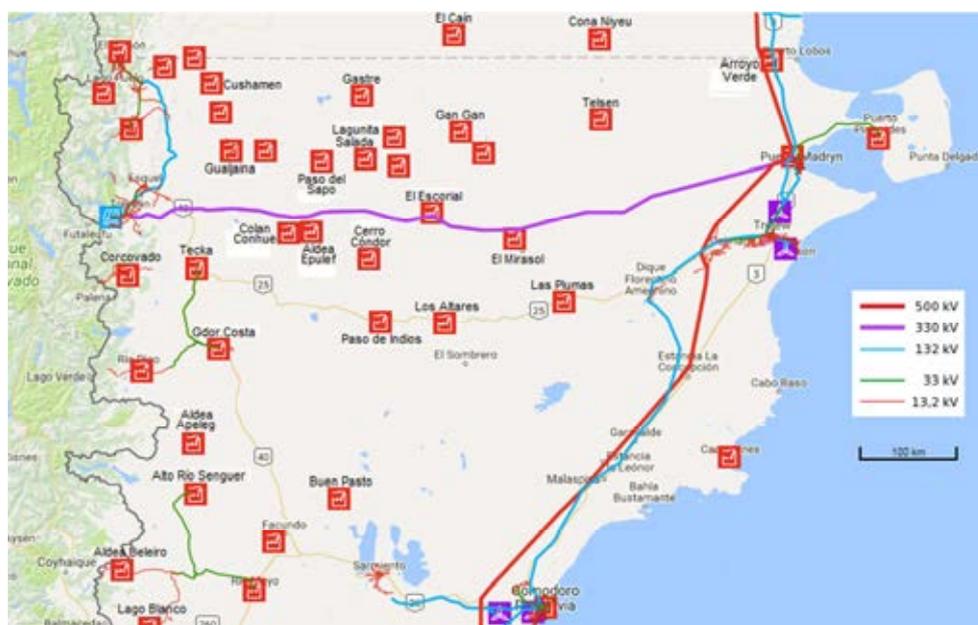


Figura 1: Puntos de generación y líneas de media y alta tensión en Chubut (SIG, 2018).

La Tabla 1 indica, para cada una de las 18 localidades, el Departamento al que pertenecen, la categoría de la localidad y la población. Por su parte, la Tabla 2 muestra la potencia de los generadores instalados, el consumo del año 2017 y el aprovechamiento de los generadores¹.

Localidad	Departamento	Categoría	Población ²		
			1991	2001	2010
Arroyo Verde	Biedma	Aldea	s/d	41	59
Cushmanen	Cushmanen	Comuna rural	405	580	740
Gualjaina	Cushmanen	Municipio	572	648	1183
Camarones	Florentino Ameghino	Municipio	828	1079	1296
Corcovado	Futaleufú	Municipio	1281	1644	1820
Gastre	Gastre	Comuna rural	440	557	602
Lagunita Salada	Gastre	Comuna rural	99	141	129
Aldea Epulef	Languiño	Comuna rural	153	150	247
Colan Conhué	Languiño	Comuna rural	224	212	262
Paso del Sapo	Languiño	Comuna rural	326	384	472
Las Plumas	Mártires	Comuna rural	343	605	480
Paso de Indios	Paso de Indios	Municipio	872	1087	1264
Los Altares	Paso de Indios	Comuna rural	107	123	230
Aldea Apeleg	Río Senguer	Comuna rural	95	119	126
Facundo	Río Senguer	Comuna rural	155	151	185
Buen Pasto	Sarmiento	Comuna rural	97	151	105
Gan Gan	Telsen	Comuna rural	480	587	661
Telsen	Telsen	Comuna rural	421	486	544

Tabla 1: Población de las localidades aisladas en la provincia del Chubut que cuentan con Cooperativas Eléctricas asistidas por la Dirección General de Servicios Públicos.

¹ Cociente entre la energía anual efectivamente generada y la máxima factible de generarse mediante uso continuo de los generadores (potencia instalada × 8760 horas/año).

² Según Censos Nacionales.

Otro aspecto a tener en cuenta al momento de analizar la problemática energética de las localidades aisladas es el alto costo del tendido de líneas de alta tensión (LAT). Según estimaciones de Transpa S.A. y de la Federación de Cooperativas del Chubut, una línea de 132 kV con una única terna tiene en la zona un costo aproximado de 150.000 USD/km, al cual debe sumarse el costo de la estación transformadora (ET) que ronda los 7 millones de dólares. En general, las localidades aisladas se encuentran alejadas de las LAT, como por ejemplo en el caso de Camarones que dista 80 km de una LAT de 132 kV sobre la Ruta Nacional 3.

Teniendo en cuenta:

- (a) que las comunas aisladas dependen exclusivamente de la disponibilidad de diésel para cubrir sus requerimientos de energía eléctrica,
- (b) las dificultades para abastecer de combustible a estas comunas en algunas épocas del año,
- (c) el elevado impacto ambiental del quemado de diésel,

resulta importante evaluar la posibilidad de diversificar las fuentes de energía, pasando de un sistema exclusivamente basado en el quemado de diésel a un sistema híbrido que aproveche dos recursos abundantes en la provincia: la energía eólica y la energía solar. Por el relativamente gran tamaño de estas comunidades aisladas, las mismas no son alcanzadas actualmente por el programa PERMER (PERMER, 2018).

Localidad	Generadores		Demanda 2017		Aprovechamiento de la $P_{instalada}$
	Cantidad	$P_{instalada}$ (kW)	P_{max} (kW)	E (MWh)	
Arroyo Verde	2	62	28	110	20,3 %
Cushamen	3	840	320	1127	15,3 %
Gualjaina	3	1630	490	1912	13,4 %
Camarones	2	1500	600	2958	22,5 %
Corcovado	2	1768	720	3872	25,0 %
Gastre	2	950	480	1829	22,0 %
Lagunita Salada	2	500	157	722	16,5 %
Aldea Epulef	2	240	140	284	13,5 %
Colan Conhué	2	340	100	629	21,1 %
Paso del Sapo	2	1020	287	1.199	13,4 %
Las Plumas	3	1270	312	776	7,0 %
Paso de Indios	2	2200	694	4119	21,4 %
Los Altares	2	270	160	905	38,3 %
Aldea Apeleg	2	220	180	270	14,0 %
Facundo	3	380	100	419	12,6 %
Buen Pasto	3	300	70	299	11,4 %
Gan Gan	2	1040	414	2346	25,7 %
Telsen	2	1400	360	3171	25,8 %

Tabla 2: Cantidad de generadores, potencia instalada, demanda de potencia y energía en 2017, y aprovechamiento de la potencia instalada, en las localidades aisladas de la provincia del Chubut.

Si bien es sabido que los vientos patagónicos son de los mejores de mundo, posibilitando factores de capacidad que han superado ampliamente el 40 %, la energía solar no deja de ser atractiva en esta zona por ser más predecible que la energía eólica (Forbes y Zampelli, 2016) y por presentar valores de irradiación solar comparables o incluso mayores a los de otras regiones del país ubicadas más al norte. A título informativo, la Tabla 3 muestra la irradiación solar global anual sobre plano inclinado óptimo para diversas localidades de las provincias de Chubut, Buenos Aires, Córdoba, Formosa y La Rioja (Righini y Grossi Gallegos, 2011).

Asimismo, cabe mencionar que las menores temperaturas medias y los mayores vientos de la Patagonia son factores que contribuyen a aumentar la eficiencia de los sistemas de generación de electricidad a partir de la conversión fotovoltaica de la energía solar.

Provincia	Localidad	Energía Anual (MWh/m ²)	Ángulo Óptimo (°)
Chubut	Trelew	1,77	35,06
Chubut	Camarones	1,59	34,73
Chubut	Comodoro Rivadavia	1,67	37,33
Córdoba	Córdoba	1,76	26,67
Córdoba	Río Cuarto	1,81	27,65
Córdoba	Marcos Juárez	1,75	26,06
Buenos Aires	San Miguel	1,68	26,98
Buenos Aires	Balcarce	1,69	29,28
La Rioja	La Rioja	1,67	26,24
Formosa	Formosa	1,79	21,13

Tabla 3: Irradiación solar global anual sobre plano inclinado óptimo en diversas localidades del país (Righini y Grossi Gallegos, 2011).

COMUNA RURAL DE TELSEN

En el presente trabajo se aborda la problemática de energía eléctrica de Telsen, comuna rural de aproximadamente 750 habitantes, cabecera del departamento homónimo. Está ubicada sobre la Ruta Provincial 4 a la vera del Río Telsen, a 165 km del pavimento más próximo (Ruta Nacional 3), a 179 km de Puerto Madryn, a 185 km de Trelew (por Ruta Provincial 8) y a 205 km de Rawson, capital provincial. Sus coordenadas geográficas son 42,44°S (latitud) y 66,95°O (longitud), y su altura es de 358 msnm. El Río Telsen tiene una longitud de 125 km y una cuenca de 3500 km². La Figura 2 muestra una imagen de la comuna de Telsen.



Figura 2: Imagen pública de la comuna rural de Telsen.

La zona tiene un microclima benigno, con manantiales de agua y vegetación diferenciada que le dan características de oasis. Telsen cuenta con los siguientes servicios e infraestructura:

- Agua potable: proviene de un manantial próximo al pueblo.
- Electricidad: una usina termoeléctrica (dos generadores trifásicos con motores Volvo) administrada por una Cooperativa Eléctrica que abastece a la red domiciliaria y de alumbrado público. La LAT con ET más cercana se encuentra a 165 km, sobre RN3, mientras que la LAT Futaleufú-Madryn, sin ET, se halla a 80 km.

- No hay red de gas natural, el gasoducto pasa a 140 km. Se utilizan garrafas. Acceder a información respecto a las necesidades energéticas en estos parajes es complejo debido a la falta de registros electrónicos. Afortunadamente, la Dirección General de Servicios Públicos exige a las cooperativas eléctricas completar en forma manuscrita el “Parte Diario de Explotación”, planillas en las cuales se refleja cada hora la potencia demandada (carga puntual) y diariamente el conteo acumulado de energía activa y reactiva y el consumo de combustible y aceite. La usina eléctrica de Telsen cuenta con dos motores Volvo TWD1643 acoplados a sendos generadores trifásicos de 700 kVA en 380-400V (ver Figura 3).



Figura 3: Usina eléctrica de Telsen, gentileza de la Sra. Mariela Curaqueo.

Para una primera estimación del potencial de la energía solar en estas latitudes se evaluó técnica y económicamente una planta solar fotovoltaica de 100 kW. En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos.

RECURSO SOLAR Y DATOS METEOROLÓGICOS

En la Tabla 4 se presentan los valores medios mensuales de temperatura, provistos por el Servicio Meteorológico Nacional para la localidad de Paso de Indios, y de la radiación solar global sobre plano horizontal (kWh/m²/día) obtenidos a partir de:

- GERSOLAR (Grossi Gallegos y Righini, 2007), Irradiación Solar Global de Paso de Indios, Chubut;
- NASA (NASA, 2008), "Global Horizontal Irradiance, NASA Surface meteorology and Solar Energy (SSE)"; Release 6.0 Data Set (Jan 2008), 22-year Monthly & Annual Average (July 1983 - June 2005),
- METEONORM (METEONORM, 2012), “Global Meteorological Database”, V7.1. (2012), <http://meteonorm.com/>.

Mes	GERSOLAR	NASA	METEONORM	Temperatura (°C)
Enero	7,4	7,4	6,0	19,1
Febrero	6,3	6,3	5,9	18,3
Marzo	4,6	4,7	4,3	15,1
Abril	3	3,2	3,1	11,0
Mayo	1,7	2,0	1,7	7,2
Junio	1,3	1,5	1,4	4,3
Julio	1,6	1,7	1,5	3,4
Agosto	2,6	2,6	2,5	5,4
Septiembre	3,9	3,9	3,7	8,3
Octubre	5,5	5,3	4,7	11,3
Noviembre	6,6	6,8	5,8	15,2
Diciembre	7,4	7,4	6,4	17,7
Anual	4,3	4,4	3,9	11,4

Tabla 4: Valores medios mensuales de irradiación solar global sobre plano horizontal (en kWh/m²/día) y de temperatura ambiente.

Las simulaciones del funcionamiento de los diferentes sistemas fotovoltaicos propuestos, presentadas en la siguiente sección, se realizaron utilizando valores medios mensuales de irradiación solar global correspondientes a la localidad de Paso de Indios extraídos de GERSOLAR. Se ha preferido utilizar estos valores debido a que están basados en mediciones terrestres mientras que los de NASA y METEONORM están modelados utilizando datos satelitales.

SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA FOTOVOLTAICA DE 100 kW EN TELSEN

Se utilizó el código de cálculo PVSyst V6.6.7 (PVSyst, 2017) para simular el funcionamiento de una planta FV con la siguiente configuración.

- Generador FV
 - Módulos FV de Si policristalino Modelo CS3U 325P, Fabricante Canadian Solar Inc., con 72 celdas solares en serie y una potencia nominal de $325 W_p^3$
 - 18 módulos en serie en cada cadena y 18 cadenas en paralelo (total 324 módulos FV)
 - Potencia global nominal del generador $105,3 kW_p$
 - Características de funcionamiento del generador ($50^\circ C$): $V_{pmp} = 610 V$ $I_{pmp} = 156 A$, donde V_{pmp} e I_{pmp} son la tensión y corriente en el punto de máxima potencia respectivamente
- Inversor FV
 - Modelo TRIO-TM-50_0-TL-OUTD-400, Fabricante ABB
 - Tensión de funcionamiento 300-950 V
 - Potencia nominal de $50 kW_{ac}$ y 3 seguidores del punto de máxima potencia cada uno
 - 2 inversores con una potencia total $100 kW_{ac}$

Se consideraron 3 alternativas para la inclinación de los módulos FV con respecto a la horizontal:

- a) inclinación óptima (35°), que maximiza la generación anual;
- b) inclinación para priorizar el invierno (60°);
- c) inclinación con ajuste estacional (24° , octubre a marzo) y (60° , abril a septiembre).

Se analizaron las alternativas b) y c) que maximizan la generación en la época invernal, época en que se incrementan las dificultades para el transporte de combustible hasta la comuna.

En la Tabla 5 se resumen los resultados obtenidos.

Inclinación ($^\circ$)	Producción Específica Anual ($kWh/kW_p/año$)	Energía Producida ($MWh/año$)
35	1621	171
60	1532	161
24 y 60	1682	177

Tabla 5: Producción anual estimada de la planta FV de $105,3 kW_p$ para los 3 casos estudiados.

A partir del consumo de la comuna de Telsen en el año 2017 (ver Tabla 2), se concluye que una planta FV de 100 kW aportaría anualmente alrededor del 5 % del consumo anual, reduciendo en la misma proporción el quemado de combustible. Utilizando los mismos componentes (módulos FV e inversores) que los considerados en este trabajo, se puede incrementar la potencia de la

³ Watt pico (W_p): potencia de un módulo FV (o una celda solar o un sistema completo) medida en condiciones estándar de operación (AM1.5, $1 kW/m^2$, $25^\circ C$).

planta en bloques de 50 kW. Sin embargo, se debe tener en cuenta que cuando la generación de la planta exceda el consumo de la comuna, el excedente de energía se perdería. En consecuencia, para poder aumentar significativamente la potencia solar instalada sería necesario agregar a la red eléctrica de Telsen un sistema de acumulación, como por ejemplo con baterías de Li-ion, que permita gestionar la inyección de energía eléctrica de origen solar a la red.

COMBUSTIBLE Y EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Según datos facilitados por la Dirección General de Servicios Públicos, el rendimiento aproximado de la usina es de 0,324 m³/MWh. Considerando el valor de emisiones equivalentes para el gasoil de 3,11 t_{eq}CO₂/m³ especificado por la Secretaría de Energía en el Cálculo del Factor de Emisión de CO₂ de la Red Argentina de Energía Eléctrica 2015 (Secretaría de Energía, 2015), resulta un ahorro aproximado de 1 t_{eq}CO₂/MWh.

Teniendo en cuenta que la producción de energía eléctrica de la planta fotovoltaica propuesta sería de alrededor de 170 MWh/año, anualmente se ahorrarían 55.000 litros de combustible diésel y se reducirían las emisiones de CO₂ equivalentes en aproximadamente 170 toneladas (t_{eq}CO₂).

ANÁLISIS ECONÓMICO-FINANCIERO

Se realizó una evaluación económico-financiera preliminar del proyecto a fin de estimar el Período de Recuperación de la Inversión (PRI), parámetro que probablemente resulte de interés para los organismos gubernamentales que administran los fondos nacionales y/o provinciales con los que se cubren los costos de operación y mantenimiento de los generadores instalados en las comunas aisladas. A nivel informativo, se determina también la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN), parámetros de mayor interés en el sector privado. Por simplicidad, no se han considerado otros factores tales como amortizaciones, impuestos, aranceles, exenciones, apalancamientos.

La evaluación económico-financiera se realizó a precios constantes, en dólares estadounidenses (USD), con los parámetros que se enumeran a continuación.

- Ingreso = ahorro del costo actual de la energía = 350 USD/MWh (incluyendo sólo el costo del combustible).
- Potencia pico de la planta FV = 105,3 kW_p.
- Producción anual de energía a comienzo de vida:
 - a) 171 MWh
 - b) 161 MWh
 - c) 177 MWh
- Degradación anual de los módulos FV = 0,8 %/año, lineal.
- Costo de instalación de la planta “llave en mano” = 2000 USD/ kW_p + IVA (REDAR, 2018).
- Costo de operación y mantenimiento marginal despreciable (se lo considera incluido en costo de mantenimiento de los generadores diésel actuales).
- Vida útil de la planta = 25 años.
- Tasa de descuento = 5 % en USD (Wasilevsky, 2017).

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos.

Inclinación (°)	PRI (años)	TIR (%)	VAN (× 1000 USD)
35	4,6	24,8	579
60	4,9	22,8	533
24 y 60	4,4	25,2	610

Tabla 6: Valores de PRI, TIR y VAN obtenidos para las 3 inclinaciones propuestas.

CONCLUSIONES

A fin de evaluar el posible aporte de la generación fotovoltaica al problema energético en comunidades aisladas de la Patagonia, se consideró el caso de la comuna de Telsen en la provincia del Chubut. En particular, se analizó el funcionamiento de una planta fotovoltaica de 100 kW de potencia nominal en corriente alterna. Las simulaciones realizadas muestran que esta planta generaría aproximadamente 170 MWh/año, con una producción específica anual superior a 1600 kWh/kW_p, valor comparable al que se obtiene en plantas fotovoltaicas en otras regiones ubicadas en la zona central del país o incluso en el norte. Dicho aporte representa alrededor del 5 % del consumo anual de Telsen. Considerando que el costo actual de la energía eléctrica generada mediante generadores diésel es de aproximadamente 350 USD/MWh (excluyendo el costo de operación y mantenimiento de los generadores) y un costo de instalación de la planta FV “llave en mano” de 2000 USD/kW_p + IVA (21 %), la evaluación económico-financiera del proyecto muestra un período de retorno de la inversión inferior a 5 años y una tasa interna de retorno superior a 20 %.

Se concluye entonces que la introducción de la energía solar FV en la matriz energética de las comunas aisladas de la provincia del Chubut contribuiría a aumentar la resiliencia del sistema eléctrico ante la escasez de combustible y a bajar los costos de generación, teniendo a su vez un período de retorno de la inversión corto comparado con la vida útil del sistema FV. Ello permite afirmar que un proyecto como el propuesto es replicable en otras comunas de la Patagonia con importantes beneficios sociales y económicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Jorge Feller y Eduardo Seba de la Dirección General de Servicios Públicos de la Provincia del Chubut, y de Juan Muriete y Mariela Curaqueo de la Cooperativa Eléctrica Telsen. Asimismo, agradecen la colaboración de la Subgerencia Regional Patagonia de la CNEA.

REFERENCIAS

- CAMMESA (2018). Programación Estacional Provisoria, Noviembre 2018 – Abril 2019. <http://portalweb.cammesa.com/MEMNet1/Pages/Informes%20por%20Categor%C3%ADa%20Publico/Programaci%C3%B3n/estacional.aspx>, visitado el 04/10/2018.
- Forbes K. y Zampelli E. (2016). The Accuracy of Wind and Solar Energy Forecasts and the Prospects for Improvement. Mannheim Energy Conference, Mannheim, Alemania. <https://www.researchgate.net/publication/303692879>.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007). Valores medios de radiación solar utilizados para la elaboración del Atlas de Energía Solar de la Rep. Argentina, 1ra Edición, ISBN: 978-987-9285-36-7, SECyT. http://www.gersol.unlu.edu.ar/Atlas_Solar/valores-medios.html.
- METEONORM (2012). “Global Meteorological Database”, V7.1., <http://meteonorm.com/>.
- NASA, 2008. "Global Horizontal Irradiance, NASA Surface meteorology and Solar Energy (SSE)", Release 6.0 Data Set (Jan 2008), 22-year Monthly & Annual Average (July 1983 - June 2005).
- PERMER, 2018. Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales. <https://permer.minem.gob.ar/>.
- PVSyst (2017). PVSyst Photovoltaic Software, V6.52, <http://www.pvsyst.com/en/>.
- REDAR (2018). Presupuesto preliminar provisto por la empresa RED AR (<http://www.redar.com.ar/>), octubre 2018.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2011). Actas del Cuarto Congreso Nacional – Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011, 11-161.
- Secretaría de Energía (2015). Cálculo del Factor de Emisión de CO₂ de la Red Argentina de Energía Eléctrica. <https://www.minem.gob.ar/www/830/25597/calculo-del-factor-de-emision-de-co2-de-la-red-argentina-de-energia-electrica> consultado el 04/10/2018.

SIG (2018). Sistema de Información Geográfica de la Secretaría (ex-Ministerio) de Energía.

<http://sig.se.gob.ar>.

Wasilevsky I. (2017). Evaluación de proyectos – Análisis económico y financiero, Fondos de Innovación Tecnológica Sectoriales (FITS), Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

ABSTRACT: The Patagonian central plateau presents several dispersed populations far from the electrical lines of the national interconnected system and whose electrical supply comes from diesel generators. This work shows the potential of photovoltaic generation to mitigate the energy problem of these communities. To this end, the annual production of a 100 kW photovoltaic plant in Telsen (Chubut) was estimated, obtaining that it would generate approximately 5 % of the annual consumption. The economic-financial evaluation shows that the payback period is less than 5 years. It is concluded that the introduction of photovoltaic generation in the energy matrix of the isolated communes would contribute to increase the resilience of the electrical system in case of fuel shortages and to reduce generation costs. This allows to claim that a project like the one proposed is replicable in other Patagonian communities with important social and economic benefits.

Keywords: photovoltaic solar energy, distributed generation, hybrid systems

MONITOREO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN

Mariela. E. Videla¹, Ismael H. Eyras¹, Julio C. Durán^{1,2}

¹Departamento Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes - Comisión Nacional de Energía Atómica. (CNEA) - Av. Gral Paz 1499 (1650) San Martín - Pcia. de Buenos Aires, Argentina. e-mail: mvidela@tandar.cnea.gov.ar

² Escuela de Ciencia y Tecnología. Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) - Tornavías Martín de Irigoyen No.3100 - Campus Miguelete - 1650 Villa Lynch - Buenos Aires. Email: duran@tandar.cnea.gov.

Recibido 20/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: En este trabajo se presenta la red de monitoreo para los sistemas fotovoltaicos distribuidos conectados a la red de baja tensión que fueron instalados en el marco del Proyecto IRESUD. Se muestra el análisis que pone de manifiesto el interés en tener los registros de generación de estos sistemas fotovoltaicos ya que cubren la totalidad de las áreas climáticas de la Argentina. Se describe la arquitectura del sistema de monitoreo distribuido, su funcionamiento y su objetivo de compartir desarrollos y administrar los servicios que surgen de la utilización de este tipo de sistemas de generación. También se presenta la organización *coworking* que se establece entre los miembros de la comunidad IRESUD y se exponen los resultados actuales del desarrollo en donde se incluye el monitoreo automático de las estaciones y algunos ejemplos de análisis con los registros que ya se encuentran disponibles en el servidor de monitoreo.

Palabras claves: monitoreo, sistemas fotovoltaicos, generación distribuida, *coworking*

INTRODUCCIÓN

En el año 2012, se formó el consorcio público-privado IRESUD entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Universidad de San Martín (UNSAM) y 5 empresas privadas con el objeto de promover el uso de la energía solar mediante sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión. Este proyecto dejó como resultado un conjunto de aproximadamente 50 sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión distribuidos a lo largo de todo el país (Eyras I. H. et al 2016). Las instalaciones forman un grupo de generadores fotovoltaicos que actualmente en total cuenta con una potencia pico total de aproximadamente 170 kWp. Además, se formó con cada uno de los actores que participaron en su construcción una comunidad que se mantiene activa y sigue creciendo a medida que nuevos miembros ingresan para utilizarla como plataforma de conocimiento y experiencia para instalar nuevos dispositivos conectados a la red de distribución eléctrica. Este grupo está integrado por organismos de ciencia y tecnología, universidades, empresas relacionadas con la generación fotovoltaica y particulares.

La experiencia adquirida en la realización del proyecto IRESUD demostró que la sinergia de estos grupos permite establecer lazos y puentes de transferencia de conocimiento, tecnología, técnicas y estrategias. Esto facilita el acercamiento con la sociedad y permite que estos organismos se involucren en desarrollos tecnológicos relacionados con la generación fotovoltaica que surgen a lo largo y ancho de todo el país.

Con el objetivo de aprovechar la red y el nacimiento de esta nueva comunidad se comenzó un nuevo proyecto de digitalización y administración de los registros de los sistemas fotovoltaicos así como de todas las variables intervinientes en la generación. Es de especial interés para el Departamento Energía Solar (DES) de la CNEA evaluar la producción de energía fotovoltaica utilizando la infraestructura de IRESUD. Uno de los principales motivos surge debido a su extensión geográfica.

El Proyecto IRESUD cuenta con sistemas fotovoltaicos en casi todas las zonas climáticas del país. Según la clasificación de Köppen- Geiger se puede observar (Figura 1) que existe al menos un sistema fotovoltaico (SF) generando energía en cada zona (Tabla 2), inclusive IRESUD tiene un SF ubicado en la base Marambio, con un clima polar y tal vez en condiciones de funcionamiento no muy frecuentes de encontrar (García J. A. et al 2017).

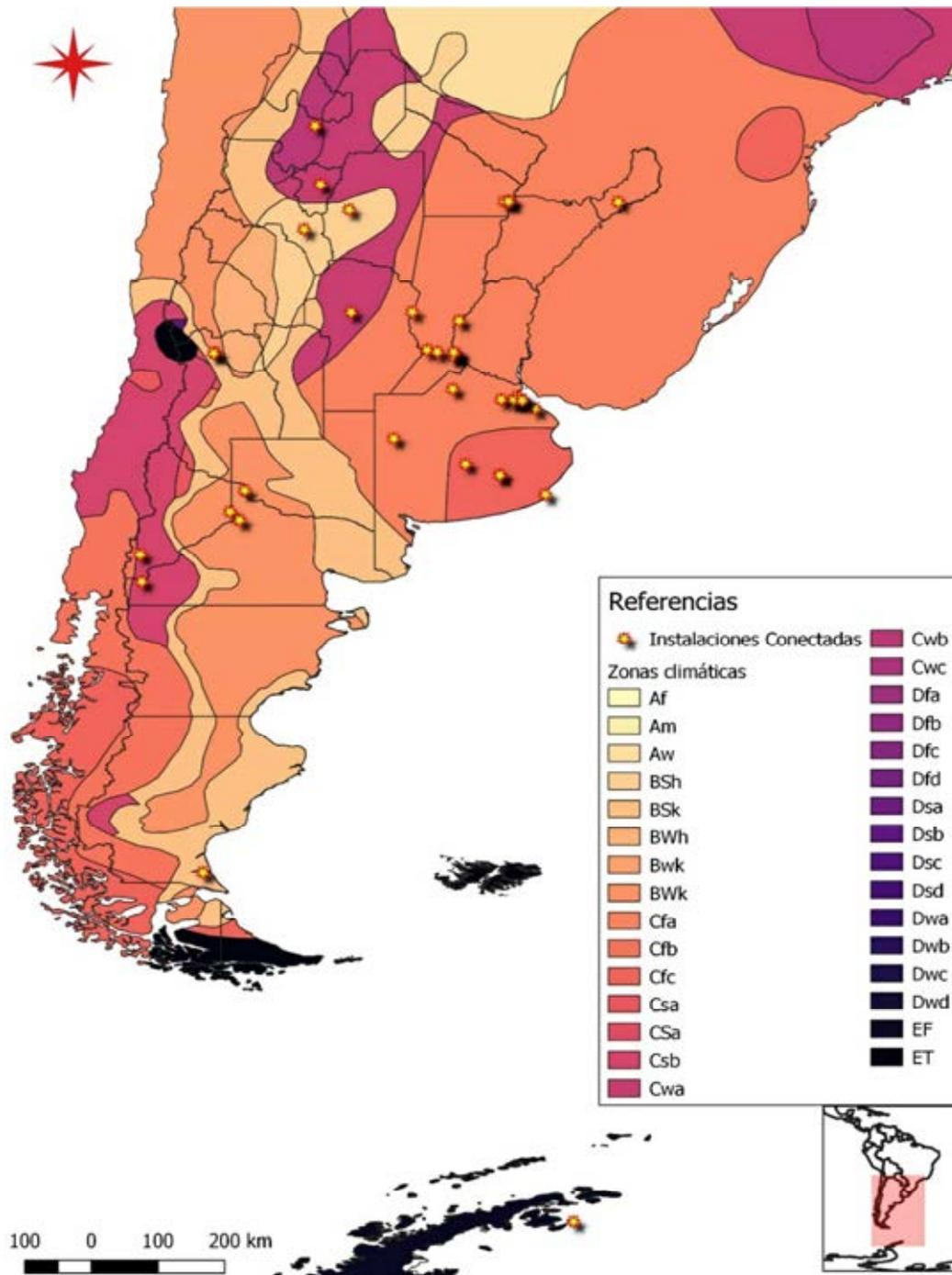


Figura 1 – Los sistemas fotovoltaicos de IRESUD se encuentran marcados con estrellas amarillas. Aunque la mayor densidad de instalaciones se ubica en la zona del Gran Buenos Aires se observan estrellas en todas las zonas climáticas.

Clima Principal	Precipitación	Temperatura
A: ecuatorial	W: desierto	h: árido caliente
B: árido	S: estepa	k: árido frío
C: temperatura templada	f: totalmente húmedo	a: verano caliente
D: nieve	s: verano seco	b: verano cálido
E: polar	w: invierno seco	c: verano fresco
F: escarcha polar	m: monzónico	d: extremadamente continental
T: tundra polar		

Tabla 1 – Definiciones de cada terna para la clasificación Köppen- Geiger. En Argentina existe al menos una instalación perteneciente a IRESUD en las zonas climáticas delimitadas para el país.

Este nuevo proyecto de digitalización requiere que se cree un sistema de adquisición de datos distribuido. Este sistema estará integrado por sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución eléctrica que pertenezcan a IRESUD y/o que estén interesados en participar del proyecto. El estado de avance, la administración y las tecnologías necesarias que se están utilizando para el diseño de este sistema se presentan en este trabajo.

INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red de IRESUD no tienen dispositivos de almacenamiento de energía. La idea principal en tal arreglo consiste en inyectar la mayor cantidad de energía a la red de distribución eléctrica. En el caso que la carga o consumo en la instalación no supere la generación, el excedente es aprovechado por la red de distribución. En este punto es que se vuelven cada vez más importantes las redes de distribución inteligentes que en algunos casos son capaces de ofertar el excedente en los puntos donde se lo necesite. El principal componente del sistema fotovoltaico junto con los paneles solares es el inversor. Este dispositivo no se encarga solamente de convertir de manera eficiente la corriente y tensión continua generada por los paneles solares o campo fotovoltaico en alterna, sino que además debe cumplir con todas las normas y reglamentos que le permitan un funcionamiento seguro.

Para poder cumplir con todas estas especificaciones es que los inversores monitorean continuamente el estado de variables eléctricas. Estas variables eléctricas son del propio sistema y de la red de distribución en donde se encuentran conectados. Estas variables son la entrada de los diferentes algoritmos que utilizan los inversores para gestionar la inyección a la red. La mayoría de los inversores que se pueden conseguir en el mercado actualmente poseen interfaces que le permiten transmitir o almacenar algunas de estas variables. Por lo general estas interfaces no vienen en los modelos base. Es decir que tienen que ser adquiridas separadamente o especificar que sean incluidas al momento de la compra.

Los inversores que se adquirieron en el marco del proyecto tienen varias interfaces disponibles y además diversos protocolos de transmisión (Tabla 2).

Marca	Modelo	Potencia	Interfaz	Grado IP de protección [3]
AEG	PV2800	2,8 kWp	RS232/RS485	IP65*
AEG	PV4600	4,6 kWp	RS232/RS485	IP65*
AROS	SIRIO	1,5 kWp	RS232	IP65*
INGETEAM	3 PLAY/1 PLAY	10 KWp	RS485	IP65*

Tabla 2 – Listado de los inversores que se instalaron durante el proyecto IRESUD. Hasta el momento existe un esfuerzo para estandarizar las diferentes interfaces y protocolos pero por el momento cada fabricante desarrolla uno propio.

Para poder tener un registro permanente de los inversores no solo es necesario que estos dispongan de interfaces de transmisión de datos sino que además es necesario una computadora que reciba esa información y la almacene. Los equipos utilizados en IRESUD tienen cada uno su propio software que permite su monitoreo. Este software propietario está diseñado para ser instalado en una computadora de escritorio con sistema operativo Windows.

Los inversores de IRESUD (y la gran mayoría de los inversores) generalmente no se encuentran instalados en ambientes de oficina donde es posible disponer de una computadora de escritorio conectada al inversor. Estos se ubican en zonas cercanas al campo fotovoltaico de manera de evitar las pérdidas de energía que se producen en un cableado de corriente continua. Además los inversores en función de su grado de protección especificado por el estándar CEI 60529 (IEC 60529, 2004) solo pueden ser ubicados en locaciones acondicionadas para tal fin. El primer paso para poder conformar un sistema de monitoreo distribuido es proveer a cada uno de los inversores un dispositivo capaz de recibir los datos de monitoreo, almacenarlos y que además éste sea de bajo costo.

RED DE MONITOREO

Para implementar la red de monitoreo es importante decidir qué variables serán las que conformarán el registro. Como se muestra en la Tabla 1 actualmente coexisten tres marcas de inversores y cada uno de ellos tiene un protocolo propio que le permite transmitir las variables que se detallan en la Tabla 2.

Nombre de variable	Descripción
Vdc	Es la tensión de corriente continua del campo fotovoltaico o del arreglo de paneles que se encuentra conectado al inversor.
Idc	Es la corriente continua que genera el campo fotovoltaico o arreglo de paneles que se encuentra conectado al inversor.
Vin	Es la tensión ac que se aplica sobre la red de distribución para inyectar.
Vac	Es la tensión ac en el punto de inyección.
Iac	Es la corriente ac que el inversor se encuentra inyectando a la red.
Fac	Es la frecuencia de la red de distribución.
Pin	Es la potencia inyectada por el inversor a la red de distribución.
Temp	Es la temperatura de trabajo del inversor
Estado	Es una variable que codifica el estado del inversor, esta puede indicar cuando el inversor está inyectando a la red, cuando no lo está haciendo o cuando ha ocurrido un fallo y el inversor se ha desconectado de la red.
Vector de fallas	Por lo general cuando el inversor detecta una falla o anomalía se desconecta de la red e indica el motivo de la desconexión en este vector. También adjunta información cuantitativa del motivo de la desconexión en caso de ser necesaria

Tabla 2 – Listado de variables que puede transmitir un inversor cuando está en funcionamiento.

Algunos inversores debido a su topología y funcionamiento no transmiten las variables de corriente continua del campo fotovoltaico. Otros al tener más de un seguidor de punto máximo de potencia (MPPT) duplican o triplican la información disponible (algo similar ocurre cuando se trata de inversores trifásicos).

En conjunto con estas variables a veces es útil conocer el valor de otros parámetros que no pertenecen al inversor. Un ejemplo de esto serían las temperaturas de los paneles solares cuando se necesita diagnosticar o conocer las curvas de corriente y tensión (curvas I-V).

Las variables meteorológicas también son importantes al momento de analizar el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos. La más importante es la radiación solar incidente en el plano de los paneles solares, estas en conjunto con la temperatura permiten comprobar el desempeño de un sistema fotovoltaico ya sea con datos experimentales o comparando su generación con simulaciones numéricas.

Una meta de la red de monitoreo de IRESUD consiste en poder registrar la mayor cantidad de variables para todos los sistemas fotovoltaicos concentrándonos en las variables del inversor y las variables meteorológicas aquí nombradas.

COMUNIDAD IRESUD

Como se mencionó en la introducción de este artículo, la red ya cuenta con una comunidad que se formó y creció en conjunto con la infraestructura de IRESUD. Es útil entonces aprovechar esta sinergia para montar también la infraestructura de la red de monitoreo. La metodología que se utiliza es la de trabajo cooperativo o *coworking* en donde la oficina virtual de este emprendimiento es un foro. Definimos la forma de trabajo como *coworking* y no solo *networking* ya que en la comunidad coexisten profesionales, técnicos, científicos y particulares que no necesariamente aportan desde la misma área de conocimiento. Cada desarrollo de un miembro en particular puede ser compartido en la comunidad y utilizado por cada uno de los miembros integrantes. La ventaja reside en que se puede establecer un diálogo directo con el desarrollador para partir de un estado del arte o conocimiento muy superior al que se partiría en caso de emprender una investigación o desarrollo de manera autónoma.

Para esto se ha organizado una oficina virtual con una ventanilla denominada “Monitoreo de Instalaciones”. En esta sección se pueden descargar tanto códigos fuentes como guías de configuración e instalación que le permiten a cada usuario incorporar sus sistemas fotovoltaicos a la red de monitoreo.

ARQUITECTURA DE LA RED DE MONITOREO

La arquitectura de la red está implementada sobre la base de dispositivos denominados *Single Boards Computers* (SBC) o computadoras de una sola placa más específicamente utilizamos las computadoras de la Fundación *Raspberry Pi* ®. Esta selección se realizó basándose en aprovechar los niveles o grados de experiencia de los miembros de IRESUD con dispositivos de aplicación en la Internet de las Cosas (*IoT*).

La plataforma de la red de monitoreo consiste en implementar los protocolos de comunicación de los inversores en estos dispositivos. La ventaja reside en que el inicio en el uso de estas computadoras es muy sencillo ya que fueron diseñadas para niveles de colegios secundarios. Los desarrollos con base en estos dispositivos pueden comenzar desde proyectos muy básicos hasta la complejidad que se desee. Esto último incluyendo la adopción de un diseño de hardware optimizado para la aplicación específica. Otro de los beneficios es que trabajan con sistemas operativos de código abierto y no existen problemas de licencia.

Actualmente existe en el foro de IRESUD un paquete que incluye el protocolo necesario para obtener los registros de los inversores AEG y AROS utilizando la interfaz RS232. Si bien se contaba con interfaz RS485 en estos modelos se pensó en conectar los dispositivos de adquisición junto a los inversores y luego conectarlos a través de internet a un servidor que concentre la información. De esta manera es posible cablear mayores distancias desde la *Raspberry* hasta el *router* más cercano (Figura 2). El paquete se descarga y con la guía de instalación se puede tener funcionando la adquisición en simples pasos. Esta es la configuración de partida. Al disponer de los códigos fuentes es posible incorporar todas las modificaciones que el usuario necesite. Una de las configuraciones posibles es

incorporar un monitor mediante un cable HDMI a la *Raspberry* y visualizar las variables que se desee. El paquete inicial solo grafica la potencia generada.

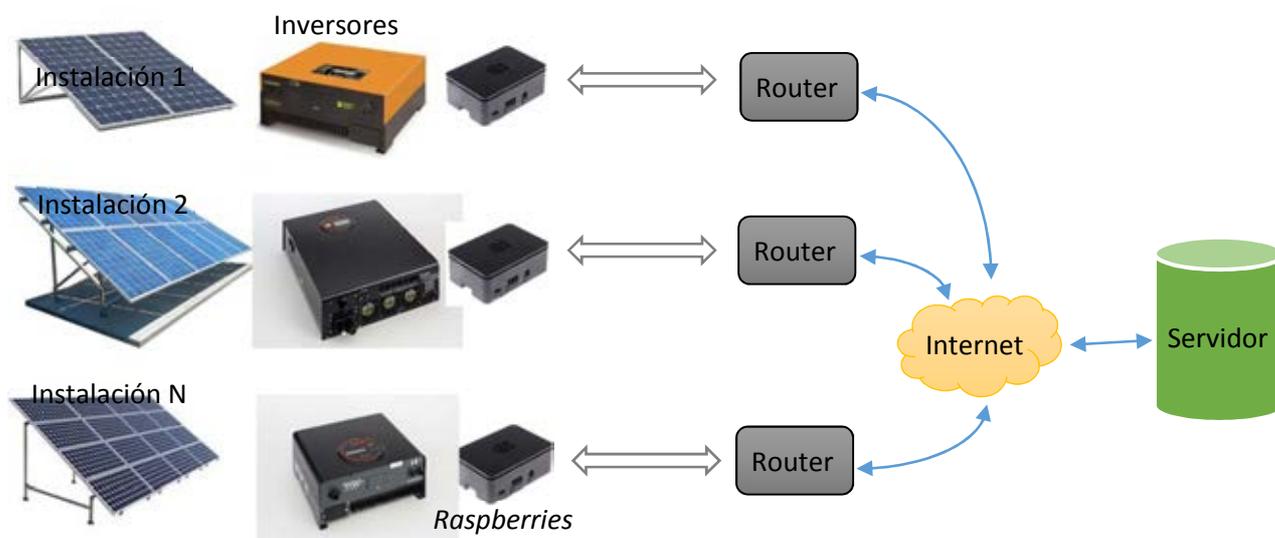


Figura 2 – Arquitectura de la red de monitoreo de IRESUD. Cada sistema fotovoltaico almacena localmente y envía los registros al servidor de monitoreo.

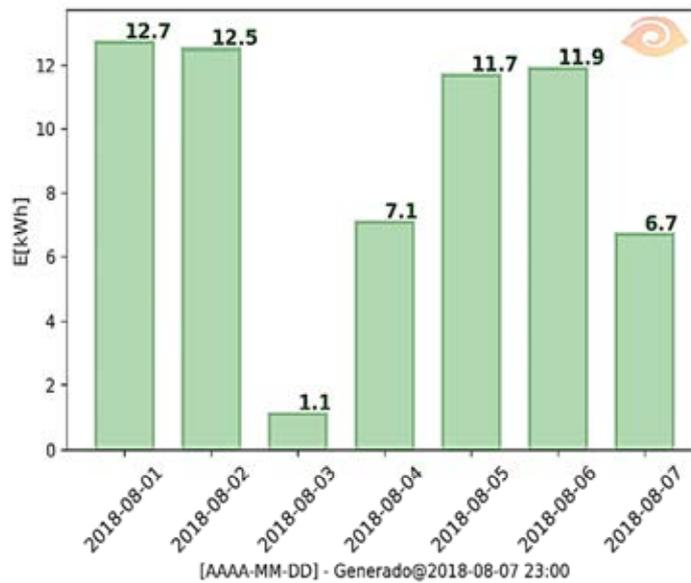
Cada miembro de la comunidad IRESUD al conectar su sistema fotovoltaico a la red de monitoreo se transforma en usuario del servidor. Esto le da acceso a los registros de los demás usuarios que están conectados a la red. En una etapa posterior se podrán visualizar y descargar todos los registros mediante un sitio web diseñado a tal fin. Actualmente hay nueve sistemas fotovoltaicos conectados a la red de monitoreo que envían sus datos al servidor central (Tabla 3).

Ubicación (ciudad)	Inversor(s)	Potencia pico instalada	Tipo de monitoreo	Clima
San Martín, BA (terraza)	AEG	2,4 kWp (variable, pruebas)	<i>RaspberryRaspberr</i>	Cfa
San Martín, BA (pérgola)	AEG	4,945 kWp	AEG ®	Cfa
Rosario, Santa Fe	AROS	2,16 kWp	AROS ®	Cfa
Santiago del Estero, Ciudad	AEG	4,8 kWp	<i>RaspberryRaspberr</i>	BSh
Santa Cruz, Ciudad	AROS	1,88 kWp	<i>Raspberry</i>	Bsk
Rojas, BA	AEG	2,88 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa
Paraná, Entre Ríos	AEG	2,88 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa
Luján, BA	AROS	1,92 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa
Capital Federal, Palacio de Hacienda	AROS	4,465 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa

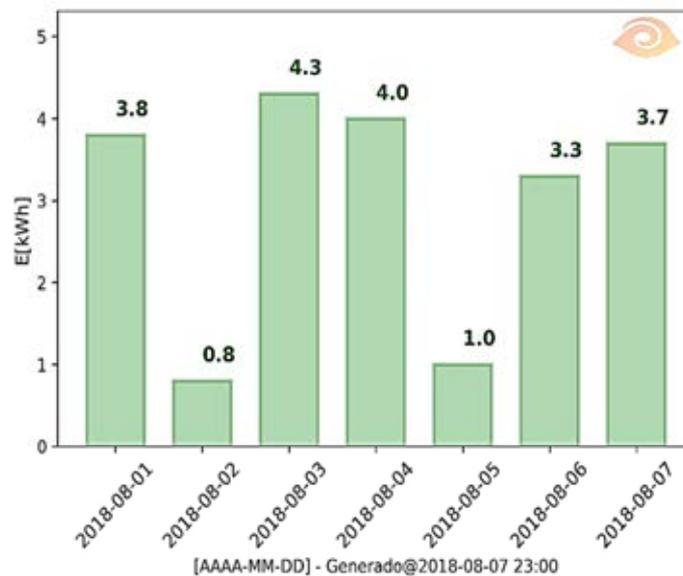
Tabla 3: SF conectados a la red de monitoreo, aquellos que se encuentran conectados a la red pero aún conservan el software propietario de monitoreo poseen un muestreo superior a los 5 minutos debido a restricciones de las redes locales en donde se encuentran funcionando.

REGISTROS EN EL SERVIDOR DE MONITOREO

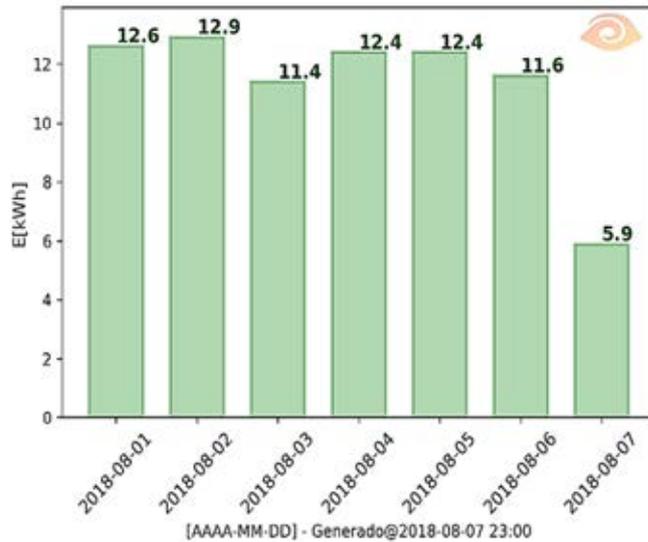
Para que el servidor de monitoreo almacene toda la información disponible en las *Raspberries*, las mismas, están configuradas para que transfieran y actualicen sus registros cada 5 minutos. El servidor en base a estos registros construye algunos gráficos que permiten actualmente hacer un seguimiento mínimo de los sistemas fotovoltaicos conectados. Estos gráficos corresponden a la potencia inyectada a la red y a la energía generada diariamente. En la Figura 3 se observan los registros de la energía generada diaria durante la primera semana de agosto del año 2018 de cuatro SF conectados a la red de monitoreo. En la Figura 3a observamos la energía diaria de un SF ubicado en la zona climática Cfa, en la Figura 3b el SF se ubica en la zona BSk, en la Figura 3c el SF se encuentra instalado en la zona Cfa y finalmente en la Figura 3d el SFV se localiza en la zona BSh. Los inversores ubicados en Santiago del Estero (Figura 3d) tienen una potencia pico de 4,6 kW, mientras que los demás sistemas corresponden a potencias entre 1,5 kW y 2,8 kW.



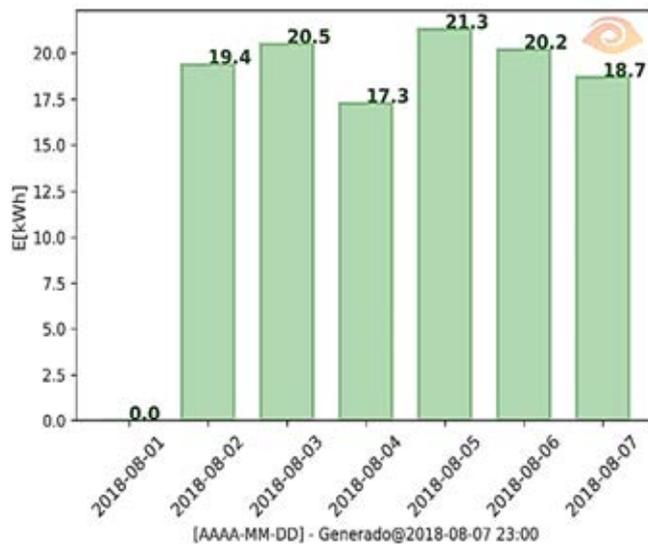
3a: Centro Atómico Constituyentes. CNEA. San Martín. Bs. As (Cfa)



3b: Universidad Tecnológica Nacional. FRSC. Rio Gallegos. Santa Cruz (BSk)



3c: Universidad Tecnológica Nacional. FRP. Paraná. Entre Ríos (Cfa)

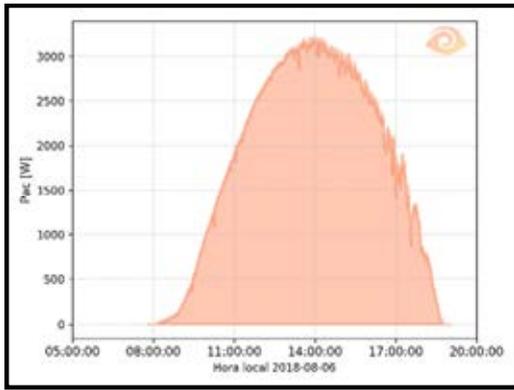


3d: Universidad Nacional de Santiago del Estero. Capital. Santiago del Estero (BSh)

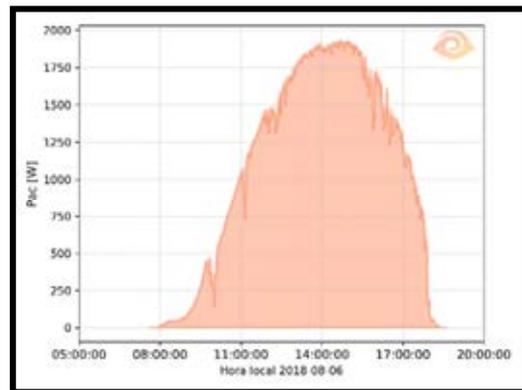
Figura 3: Energía inyectada a la red por SF instalados en diferentes regiones de Argentina. Notar que la escala del eje y no es la misma en todos los gráficos debido a que el servidor auto escala el eje para que las figuras tengan el mismo tamaño.

El símbolo amarillo ubicado en la esquina superior derecha indica que los gráficos fueron generados automáticamente por el servidor.

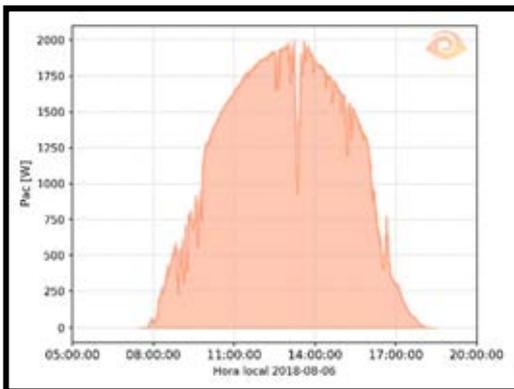
A modo de ejemplo se presentan las curvas de potencia instantánea para un mismo día de agosto (Figura 4) en el mismo momento pero en diferentes locaciones (Figura 5).



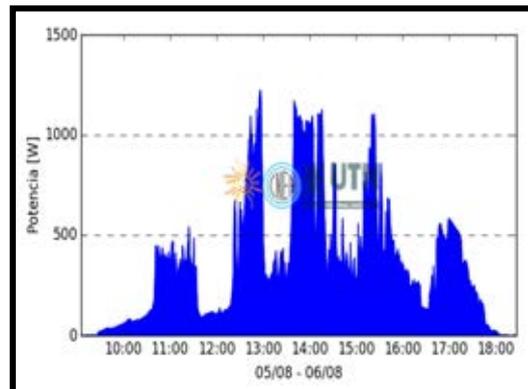
4a: Universidad Nacional de Santiago del Estero



4b: UTN Facultad Regional Paraná



4c: CNEA Terraza Edificio Tandar



4d: UTN facultad Regional Santa Cruz

Figura 4: Potencia generada en diferentes SF de la red de monitoreo. Se observa en color azul la curva del SF de la UTN Regional Santa Cruz que se grafica localmente en la Raspberry y luego es transmitida al servidor. En rojo se presentan las curvas generadas automáticamente por el servidor utilizando los datos transmitidos.

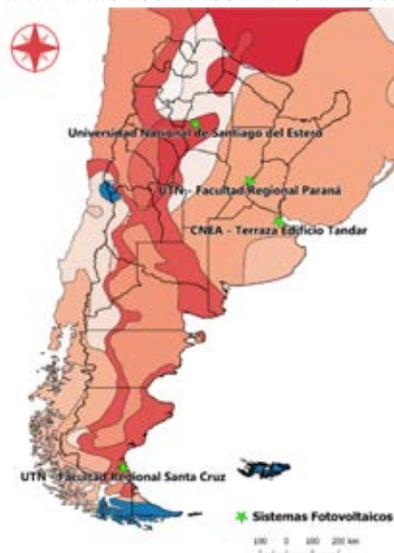


Figura 5: Ubicación de los SF analizados.

Finalmente se muestra un análisis del sistema fotovoltaico ubicado sobre el edificio de la Cooperativa de Luz y Fuerza Eléctrica de Rojas en la Ciudad de Rojas, Buenos Aires. Este análisis se realizó con un conjunto compuesto por las variables que se encuentran disponibles y que permiten diagnosticar un problema durante el día 18/7/2018 (Figura 6). En este ejemplo se graficó la tensión del arreglo de paneles y la temperatura del inversor durante el día en azul y amarillo respectivamente (Figura 6a). Se observa que la tensión en el campo fotovoltaico no presentaba ninguna anomalía. En la Figura 6b se presenta la curva de estado de funcionamiento del inversor, la misma verificaba que aun teniendo tensión en los paneles no se estaba inyectando energía a la red (estado 2). Las curvas de potencia y tensión de la red no se muestran ya que ambas se encontraban en cero. Este SF posee una llave térmica en la salida del inversor que se conecta a la red eléctrica. En esta ocasión la llave se encontraba en posición de apagado. Es por esta razón que el inversor al no detectar tensión de red pero aun teniendo tensión en el campo fotovoltaico no inyectaba a la red cumpliendo con las normas establecidas para el funcionamiento de inversores.

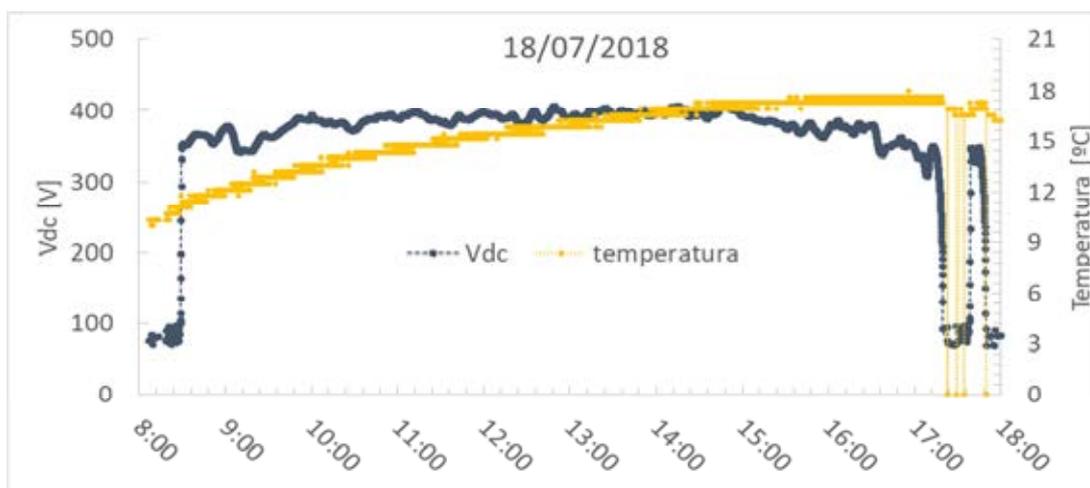


Figura 6: Tensión del conjunto de paneles y temperatura del inversor del sistema fotovoltaico de la ciudad de Rojas.

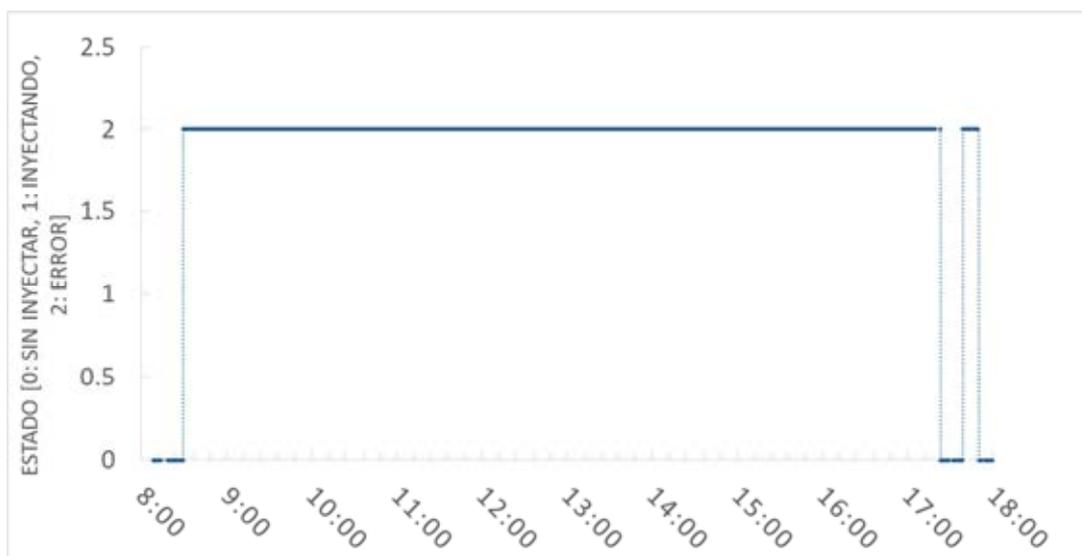


Figura 6 – Curva de la variable de estado del sistema fotovoltaico de la ciudad de Rojas. Permanece en estado 2 (error) durante todo el día hasta que el nivel de tensión del arreglo de paneles disminuye a valores por debajo de los 100 V en ese momento la variable de estado se coloca en 0 indicando que el sistema está fuera de línea.

También se puede observar en las Figuras 6 y 5 que cuando la tensión de los paneles disminuía por debajo del rango de funcionamiento el inversor se apagaba hasta que este valor alcanzaba nuevamente

el valor mínimo de funcionamiento. Como esto ocurrió durante el atardecer (bajos valores de radiación) el inversor ingresó en una fase de verificación de la tensión de red y nivel de tensión del campo fotovoltaico. Esto se observa en la alternancia entre los estados 2 y 0 al final de la curva en la Figura 6.

CONCLUSIONES

En este artículo se describe el diseño del sistema de monitoreo de SF conectados a la red de baja tensión. La experiencia adquirida en la realización del proyecto IRESUD demostró que la comunidad organiza entre estos grupos una sinergia que permite establecer lazos y puentes de transferencia de conocimiento, tecnología, técnicas y estrategias. Esto facilita no solo el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo sino que también produce un acercamiento entre la sociedad y cada uno de los actores del sistema científico tecnológico. El estado actual del sistema de monitoreo está permitiendo registrar cada vez más instalaciones fotovoltaicas pertenecientes a IRESUD inclusive hay interés de agregar sistemas que no integraron el proyecto inicial. En caso de fallas se transmiten las advertencias a cada uno de los responsables para que se tomen acciones ya sea de mantenimiento como de reparaciones. El servidor con su funcionamiento actual permite compartir la información de los registros. Esta actividad será más simple de realizar cuando se genere el sitio web destinado a tal fin. Se espera que se integren más instalaciones. Al momento de escritura de este artículo se están por incorporar a la red los sistemas fotovoltaicos instalados en la Universidad Nacional de La Plata y la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los miembros de la red IRESUD y en especial a Carlos Juarez, Romina Rodriguez, Pablo Bahamonde, Gabriel Gareis, Fabián Arrostito y Diego Ferreyra por su activa colaboración en el foro. También agradecemos a María José Saletta por su ayuda en la confección de los mapas GIS de la red y a Gabriela Durán quien coordina las cuestiones administrativas, contables y de difusión del proyecto IRESUD.

ANÁLISE DO PERFIL DE BORO PARA PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BASE P COM REDUÇÃO DE ETAPAS TÉRMICAS

T. Crestani, I. Zanesco, A. Moehlecke, M. Ly.

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS),

Escola de Ciências, Escola Politécnica,

Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar)

Av. Ipiranga, 6681 – Prédio 96A – Tecnopuc- Porto Alegre-RS, CEP 90619-900

Tel. 55-51-33203682, e-mail: izete@pucrs.br

Recibido 17/08/18, aceptado 28/09/18

RESUMO: Células solares processadas com boro estão sendo produzidas pela indústria devido a possibilidade de aumento de eficiência e a difusão de boro é uma etapa importante. Uma alternativa à difusão com BBr_3 é o método de *spin-on*. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o perfil de boro produzido por *spin-on* e com redução de etapas térmicas, na formação do campo retrodifusor bem como os parâmetros elétricos de células solares. Para reduzir os passos, a difusão de boro e oxidação foram realizadas na mesma etapa térmica. Concluiu-se que o óxido de silício foi eficaz em evitar a difusão de fósforo na face com boro e que ocorreu a segregação do boro para a camada de SiO_2 , independente da temperatura de difusão de boro (T_B). Células solares processadas com $T_B = 970$ °C alcançaram a eficiência de 17,3 %, que corresponde ao maior valor de dispositivos desenvolvidos no Brasil.

Palavras chave: célula solar de silício, campo retrodifusor, perfil de dopagem de boro.

INTRODUÇÃO

As células solares de silício são formadas pela difusão de dopantes nas superfícies das lâminas. Dentre as diversas estruturas que podem ser processadas em lâminas de silício cristalino tipo p, há a estrutura n^+pp^+ com difusão frontal de fósforo e uma região posterior, dopada geralmente com alumínio, denominada de campo retrodifusor ou BSF (*back surface field*). Nas células solares produzidas na indústria o BSF é formado por pasta de Al e este processo produz abaulamento, principalmente em lâminas finas de silício cristalino (Hilali et al. 2007). Além disso, para fabricar células solares de alta eficiência, uma dopagem seletiva para formar o emissor ou o campo retrodifusor é necessária, pois é possível minimizar a recombinação dos portadores de carga minoritários e a resistência em série. A estrutura n^+pp^+ também pode formada com difusão de boro na face posterior (Battaglia et al. 2016). Neste caso, é possível passivar a face posterior além da face frontal e, conseqüentemente, a recombinação dos portadores de carga minoritários pode ser reduzida nas superfícies. Também cabe destacar que a difusão de boro possibilita produzir células solares bifaciais (Barth et al. 2013), enquanto que com a difusão de alumínio somente é possível formar a região posterior em células solares monofaciais.

A fonte mais comumente utilizada para formar a região altamente dopada p^+ é o líquido tribrometo de boro (BBr_3). O uso de BBr_3 necessita de requisitos de segurança e, conseqüentemente, aumenta o custo de produção (Nursman et al. 2010). Porém, diferentes técnicas podem ser utilizadas para implementar a difusão de boro em lâminas de silício visando a redução do custo do processo. O método denominado de *spin-on* consiste na deposição de líquido dopante com boro na superfície da lâmina e difusão pode ser em forno convencional (Zanesco et al. 2012^a; Crestani et al. 2017; Singha e Solanki, 2017). Este método produz dopagem uniforme (Taon, 1999) e consiste em depositar o líquido com o dopante na lâmina de silício e imediatamente colocá-la em rotação para formar uma fina camada uniforme na superfície. Para realizar a difusão de boro, primeiramente seca-se a amostra em

estufa a fim de evaporar os solventes. Singha e Solanki (2017) apresentaram a análise da camada altamente dopada com boro formada usando a técnica de *spin-on*. Considerando que o perfil de dopagem de boro varia para diferentes condições de difusão, tais como tempo e temperatura, Singha e Solanki (2017) avaliaram os perfis de concentração de boro em função da profundidade ($C_S - x_j$) por espectrometria de massa de íons secundários. Concluíram que a camada rica em boro (*boron rich layer*) depende da concentração de boro no líquido e da espessura do filme. Também verificaram que o pico da concentração de boro próximo à superfície foi da ordem de 10^{21} átomos/cm³.

No trabalho desenvolvido por Barth et al. (2013) foram avaliadas as implicações em utilizar a técnica de *spin-on* para difusão de boro na fabricação de células solares bifaciais em lâminas de silício crescido pelo método Czochralski (Si-Cz), tipo-n. O método de *spin-on* foi comparado com a difusão convencional de boro a partir de BBr₃ por meio da medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários e a corrente de saturação do emissor (J_{0e}). Os valores de J_{0e} e do tempo de vida demonstraram que não ocorreram diferenças significativas. Nos dispositivos com difusão de boro por *spin-on*, a eficiência foi de 19,38 % enquanto que as células solares processadas com BBr₃ alcançaram a eficiência de 19,60 %, somente um pouco maior (Barth et al. 2013).

Nos últimos anos, o processo padrão com difusão de Al a partir de pasta, serigrafia e forno de esteira foi responsável por mais de 90 % da produção de células solares e módulos fotovoltaicos (Green, 2015). Porém, a tecnologia PERC (*passivated emitter and rear contacts*), que são células com face frontal e posterior passivadas, permite aos fabricantes produzirem dispositivos que ultrapassam os 20 % de eficiência de conversão de energia. Os primeiros registros da PERC ocorreram em 1989, apesar de ter sido concebida vários anos antes na *University of New South Wales*. Porém, somente a partir do segundo semestre de 2014, células solares PERC vêm sendo produzidas industrialmente, tornando-se a tecnologia de silício cristalino com a segunda maior capacidade de produção. Para 2020, a previsão é que esta tecnologia seja a mais utilizada na produção de células solares comerciais. As características técnicas atrativas são a redução da recombinação dos portadores de carga minoritários na superfície posterior por uma combinação de passivação com materiais dielétricos e redução da área de contato de metal/semicondutor, que também aumenta a reflexão na superfície posterior (Green, 2015).

O crescimento comercial da produção da PERC iniciou com a empresa Suntech Power, que foi uma das primeiras a relatar progresso na implementação da produção em 2009. A célula solar base n incorporou um processo de emissor seletivo formado por laser atingindo volumes de produção de 0,5 GW/ano. Em 2011, foi alcançada a eficiência de 20,3 %. Em 2012, a empresa Schott Solar relatou a eficiência de 21 % em silício monocristalino. Neste mesmo ano, a fabricante Q-Cells obteve células solares PERC com eficiência de 19,5 % e módulos fotovoltaicos com 18,5 % de eficiência. Na sequência, a empresa Trina Solar alcançou a eficiência de 20,8 % e de 19,2 % para células solares e módulos fotovoltaicos, respectivamente. A empresa Global Sunrise com um processo de produção PERC compatível com pastas de serigrafia, em 2012, produziu dispositivos com eficiência média maior que de 20 % (Green, 2015).

Atualmente, os processos industriais da produção de células solares PERC em lâminas de Cz-Si, tipo p, de 6 polegadas atingiram a eficiência média de 20,9 % (Werner et al., 2017). Neste caso, para melhorar a face frontal da célula solar, foram testados métodos de dopagem de fósforo utilizando laser para formar o emissor. Feldmann et al. (2014) desenvolveram células solares em substrato tipo n com dióxido de silício de tunelamento ultrafino e campo retrodifusor de fósforo, que reduz significativamente a recombinação de superfície na interface metal-semicondutor. Obtiveram uma baixa resistência em série, e consequentemente um alto fator de forma de 82 % e eficiência de 23,0 %, com emissor de boro e os contatos posteriores passivados. Esta tecnologia aumenta ainda mais a eficiência desta célula solar (Feldmann et al. 2014).

A célula solar com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio está sendo estudada (Crestani et al. 2016^a; Crestani et al. 2016^b; Zanesco et al. 2018), pois evita o abaulamento e permite a passivação de ambas as faces, possibilitando o aumento da eficiência. Neste tipo de célula solar, a dopagem com boro é uma etapa importante para alcançar altas eficiências. Além disso, é possível reduzir etapas do

processo, que contribui para diminuir o custo de produção. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o perfil de dopagem de boro produzido a partir da técnica de *spin-on* com difusão e oxidação em forno convencional na mesma etapa térmica para a formação do campo retrodifusor em lâminas de Si-Cz, tipo p, grau solar. Especificamente, será avaliado o perfil de dopagem de boro em função da temperatura considerando que a oxidação foi realizada na mesma etapa térmica que a difusão de boro e serve para proteger a superfície dopada com boro da difusão de fósforo. Desta forma, reduz-se uma etapa térmica e uma limpeza química. Considerando que as lâminas de Si-Cz são grau solar, a redução de etapas térmicas evita a degradação do substrato. O campo retrodifusor seletivo foi formado com a deposição por serigrafia de pasta de alumínio sobre a região dopada com boro. Portanto, entre as trilhas metálicas de alumínio tem-se uma região dopada com boro com maior resistência de folha, para reduzir a recombinação dos portadores de carga minoritários, e a região sob as trilhas metálicas dopada com alumínio para reduzir a resistência de contato.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1 comparam-se as etapas para a difusão de boro e fósforo em lâminas de Si para a fabricação de células solares com o método proposto e o método convencional. Da Figura 1-a, nota-se que com o processo convencional com BBr_3 são necessárias nove etapas e quatro processos a alta temperatura: duas oxidações e duas difusões. No entanto, com a técnica de *spin-on* e o método proposto, etapas do processo são reduzidas e a difusão de boro em uma face e de fósforo na outra face são obtidas com somente dois processos térmicos: 1) a difusão de boro e oxidação e 2) a difusão de fósforo. Além disso, com este método um ataque de óxido e uma limpeza química são evitadas. O processo de difusão dos dopantes proposto está esquematizado na Figura 1-b, destacando-se as difusões de boro e de fósforo.

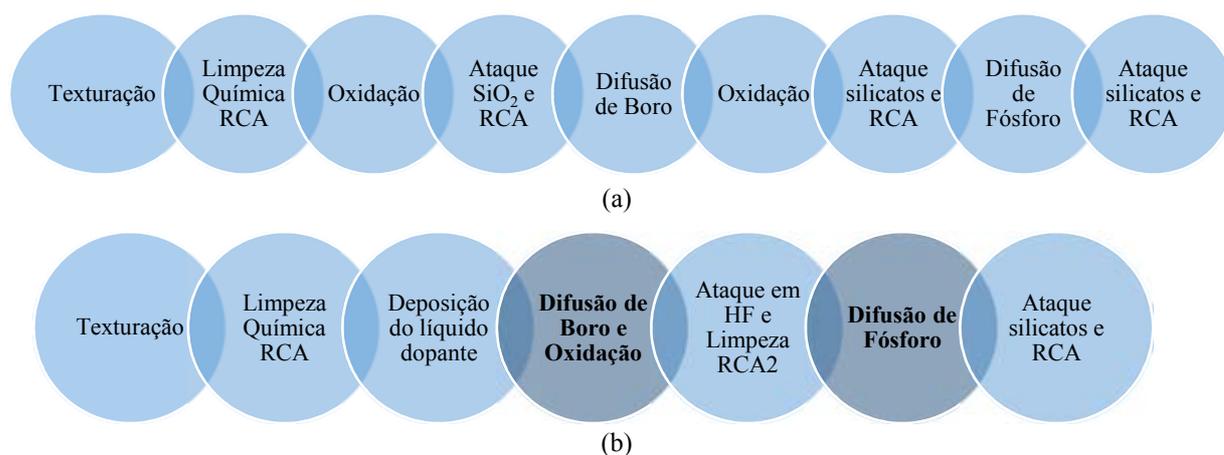


Figura 1: Processo de difusão dos dopantes boro e fósforo em lâmina de Si-Cz para a fabricação de células solares (a) com o método convencional a partir de BBr_3 e (b) com o método proposto usando a técnica de *spin-on*.

Foram utilizadas lâminas de Si-Cz, tipo p, grau solar, com 100 mm de diâmetro, espessura de $(200 \pm 30) \mu m$, orientação dos planos cristalinos $\{100\}$ e resistividade de base entre $1 \Omega.cm$ e $20 \Omega.cm$. Inicialmente, as lâminas de silício foram texturadas em uma solução de KOH, álcool isopropílico e água deionizada. Na sequência, foram submetidas à limpeza química RCA2 (Kern, 1993). Então, o líquido contendo boro PBF20, da Filmtronics, foi depositado por *spin-on* e, após a evaporação dos solventes, as lâminas foram introduzidas no forno com tubo de quartzo para a difusão de boro para formar o campo retrodifusor p^+ . Nesta etapa, variou-se a temperatura de difusão de boro de $930 \text{ }^\circ C$ a $1000 \text{ }^\circ C$ e na mesma etapa térmica, foi realizada a oxidação para proteger a face dopada com boro da difusão de fósforo. O tempo de difusão de boro foi de 20 minutos (Crestani et al. 2016^a; Crestani et al. 2016^b). Em seguida, o óxido na face em que é realizada a difusão de fósforo foi atacado em solução com ácido fluorídrico e uma nova limpeza química RCA2 foi realizada. A difusão de fósforo para formar o emissor frontal n^+ foi implementada no forno de quartzo a partir de $POCl_3$ (oxicloreto de fósforo) na temperatura de $845 \text{ }^\circ C$ (Zanesco e Moehlecke, 2012^a). Algumas etapas deste

processo de difusão de dopantes estão sendo patenteadas no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) (Zanesco e Moehlecke, 2012^b).

Para caracterizar a dopagem de boro e de fósforo foi medida a concentração do dopante em função da profundidade. A técnica utilizada para determinar o perfil de dopagem é a técnica ECV (*electrochemical capacitance voltage*) (Peiner et al. 1995). É um método destrutivo da amostra, que consiste em atacar a superfície por meio de uma solução de bifluoreto de amônia e a partir da medição da capacitância em função da tensão elétrica aplicada determina-se a concentração de dopante em função da profundidade na amostra (CVP21, 2011). Na Figura 2 apresenta-se um esquema do sistema de medição utilizado.

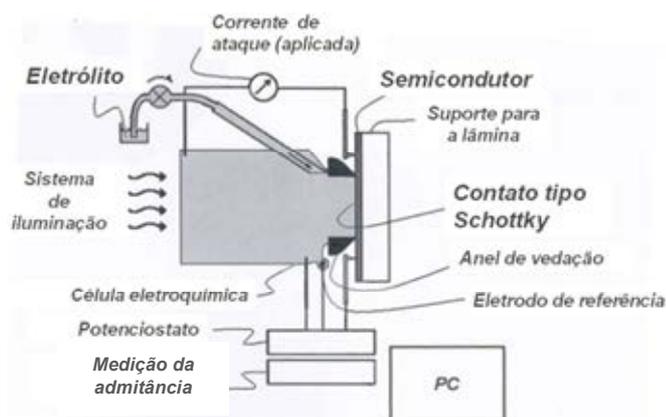


Figura 2. Esquema do sistema de medição utilizado para obter a concentração de dopante em função da profundidade. A capacitância é obtida a partir da admitância.

Na Figura 2 observa-se que a lâmina de Si é apoiada em um suporte e fixada com dois contatos metálicos e uma estrutura é colocada na lâmina onde um anel de vedação cria uma área na qual o eletrólito forma uma interface com a lâmina.

Mediu-se também a resistência de folha após a difusão de boro e de fósforo, no emissor e na região p^+ altamente dopada com boro. A resistência de folha foi medida em 13 regiões na lâmina de Si e calculou-se a média e o desvio padrão, que caracteriza a uniformidade da difusão. Utilizou-se o método denominado de “quatro pontas”, onde as pontas condutoras entram em contato com o material que se quer analisar. Em duas pontas é aplicada a corrente elétrica e a tensão elétrica é medida pelas outras duas pontas.

Após a avaliação da dopagem de boro e a partir de um processo otimizado previamente foram fabricadas células solares e obteve-se o dispositivo com maior eficiência produzido no Brasil (Zanesco et al. 2018). Na Figura 3 mostram-se as etapas do processo de fabricação após a difusão de fósforo. As etapas anteriores estão representadas na Figura 1-b. Portanto, para dar sequência ao processo foi realizado o ataque do silicato de fósforo e do silicato de boro e a limpeza química RCA2. A passivação de ambas as faces foi implementada com o crescimento de dióxido de silício por oxidação seca. A camada de SiO_2 no emissor frontal de fósforo foi de aproximadamente 53 nm e no campo retrodifusor de boro foi da ordem de 10 nm (Zanesco et al. 2017). Um filme antirreflexo de dióxido de titânio de 25 nm foi depositado na face frontal usando a técnica de feixe de elétrons. Na metalização por serigrafia foi formada a malha metálica na face frontal com pasta de prata e no BSF posterior a malha metálica foi formada com a pasta de Al e Ag. Com a etapa de queima das pastas metálicas difundiu-se o alumínio que formou o campo retrodifusor seletivo. Por fim, foi realizado o corte a laser para formar células solares com área de 4 cm².

A estrutura da célula solar com campo retrodifusor seletivo n^+pp^+ está ilustrada na Figura 4. A região p^+ entre as trilhas metálicas foi dopada com boro e a região sob as trilhas metálicas foi dopada com Al, formando um campo retrodifusor seletivo.



Figura 3: Etapas do processo de produção de células solares a partir da difusão de fósforo, que resultou no dispositivo com maior eficiência desenvolvido no Brasil.

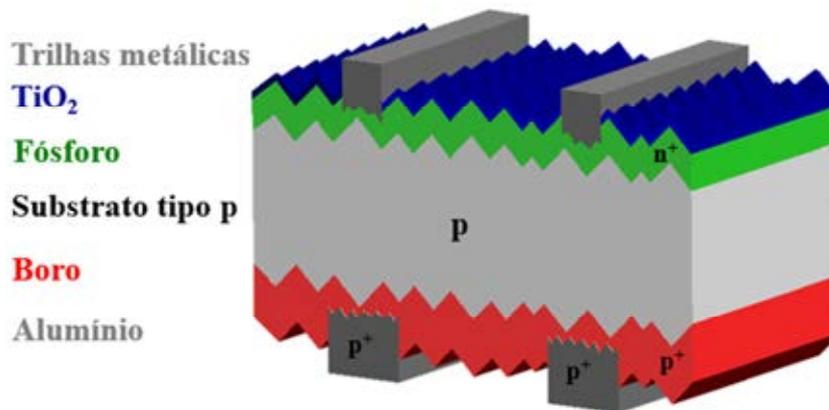


Figura 4: Estrutura n^+pp^+ da célula solar com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio.

Após o processamento, as células solares foram caracterizadas por meio da medição da corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva I-V) com auxílio do simulador solar, modelo CT150AAA, fabricado pela empresa PET (*Photo Emission Tech., Inc.*). A classificação deste equipamento é AAA (Photo Emission Tech, 2015), de acordo com a norma E927 da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), que se refere às especificações para simuladores solares para medição de células solares de uso terrestre. Um simulador solar é basicamente composto por um sistema de iluminação, uma base com controle de temperatura, uma fonte de corrente e tensão elétrica variável e um multímetro digital. O método de medição da curva I-V consiste na iluminação contínua da célula solar com uma lâmpada de xenônio e, com auxílio de um programa computacional, varia-se a tensão elétrica aplicada. A curva I-V das células solares foi medida sob condições padrão de medição: temperatura da célula solar de 25 °C e irradiância de 1000 W/m². Utilizou-se, como padrão, uma célula solar calibrada no CalLab - FhG-ISE (*Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme*), Alemanha. Desta forma, obteve-se a densidade de corrente de curto-circuito (J_{SC}), a tensão de circuito aberto (V_{OC}), o fator de forma (FF) e a eficiência (η) do dispositivo. A J_{SC} é a razão entre a corrente de curto-circuito e a área das células solares.

Para avaliar a passivação na superfície mediu-se a resposta espectral e a refletância da célula solar com maior eficiência para obter a eficiência quântica interna (EQI). Utilizou-se o equipamento modelo PVE300, fabricado pela empresa *Bentham*, que atende as normas IEC60904-8, ASTM1021-95 e JIS C 8915. Este equipamento opera com duas fontes de radiação, sendo uma lâmpada de xenônio e uma lâmpada halógena. O monocromador separa a radiação em comprimentos de onda e o intervalo de medição é de 300 nm a 1100 nm. A EQI representa a eficiência com que os fótons não transmitidos ou refletidos podem gerar pares elétron-lacuna coletáveis. A resposta espectral é definida como a razão entre a corrente elétrica gerada pela célula solar em relação à potência da radiação incidente, num determinado comprimento de onda. Com a utilização de uma esfera integradora mediu-se a refletância e, deste modo, calculou-se a EQI das células solares.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise do perfil de boro

Na Tabela 1 apresenta-se a temperatura de difusão de boro (T_B) utilizada em cada processo bem como a resistência de folha ($R_{\square B}$) média obtida, a concentração de boro na superfície (C_s) e a profundidade

do campo retrodifusor (x_j). Estas medidas foram realizadas em amostras de silício Cz tipo p com difusão de boro em uma face e de fósforo na outra face produzidas com redução de etapas térmicas e limpezas químicas e difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica.

Com relação à resistência de folha, os resultados obtidos foram os esperados e quanto maior a temperatura de difusão de boro menor é a resistência de folha, conforme mostra a Figura 5. Com exceção do resultado para $T_B = 960\text{ °C}$, o desvio padrão da resistência de folha foi menor que $2\ \Omega/\square$, indicando boa uniformidade da difusão de boro. Este resultado também demonstra que o óxido de silício crescido na mesma etapa térmica que a difusão de boro é eficaz em evitar a difusão de fósforo na face previamente dopada com boro. Da mesma forma, na Figura 6-a nota-se que a concentração em superfície de boro (C_s) aumentou com o aumento da temperatura de difusão, variando de aproximadamente $3,0 \times 10^{19}$ a $5,0 \times 10^{19}$ átomos/cm³. Da Figura 6-b e Tabela 1 verifica-se que a profundidade do campo retrodifusor variou de $0,6\ \mu\text{m}$ a $1,3\ \mu\text{m}$, com o aumento da T_B de 930 °C a 1000 °C .

T_B (°C)	$R_{\square B}$ (Ω/\square)	C_s ($\times 10^{19}$ átomos/cm ³)	x_j (μm)
1000	$21,8 \pm 0,5$	4,9	1,3
990	$23,0 \pm 1,8$	4,6	1,1
980	$36,7 \pm 1,1$	3,4	0,9
970	$43,2 \pm 1,7$	3,8	0,9
960	54 ± 7	3,7	0,7
950	$55,8 \pm 2,0$	3,8	0,7
940	$62,8 \pm 1,9$	3,5	0,6
930	$73,8 \pm 1,6$	3,0	0,6

Tabela 1: Resistência de folha, concentração de boro em superfície e profundidade do campo retrodifusor em função da temperatura de difusão de boro para o processo de difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica, medidos após a difusão de fósforo.

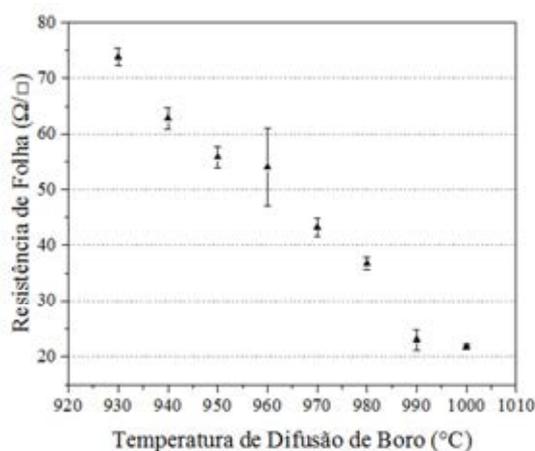


Figura 5: Resistência de folha em função da temperatura de difusão de boro para o processo de difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica, medida após a difusão de fósforo.

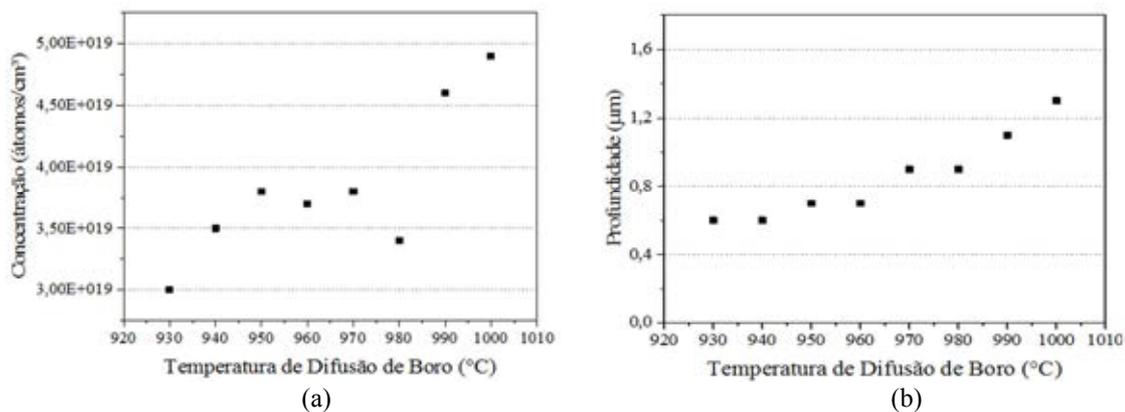


Figura 6: (a) Concentração de boro em superfície e (b) profundidade do campo retrodifusor em função da temperatura de difusão de boro para o processo de difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica, medidas após a difusão de fósforo.

Na Figura 7 apresenta-se o comportamento da concentração de dopante em função da profundidade. Observa-se que ocorreu uma redução da concentração de boro na superfície. Este resultado está relacionado com o crescimento do óxido de silício, após a difusão de boro, devido a segregação do boro para a camada de SiO₂. O parâmetro m é definido como a razão entre a solubilidade de átomos da impureza no silício pela solubilidade dos átomos na camada de SiO₂. O boro segrega do silício para a camada de SiO₂, sendo o $m < 1$, da ordem de 0,1 a 0,3 (Machala et al. 1997). A camada rica em boro depositada pela técnica de *spin-on* não foi suficiente para evitar a redução do dopante na região próxima à superfície. De qualquer forma, uma redução da concentração próxima à superfície é típica em difusões de boro. Por exemplo, Zanesco et al. (2012) apresentaram a concentração em superfície de $4,5 \times 10^{-19}$ átomos/cm³ para o campo retrodifusor de boro formado por *spin-on* com o líquido dopante PBF20 e difusão em forno convencional a 1000 °C. Este valor é similar ao valor, de $4,9 \times 10^{-19}$ átomos/cm³, apresentado na Tabela 1 para $T_B = 1000$ °C.

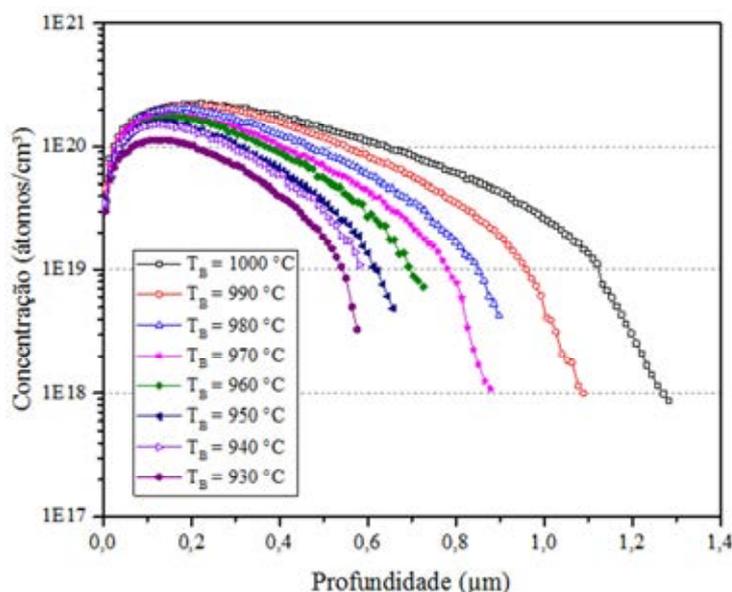


Figura 7: Perfil de dopagem de boro para diferentes temperaturas de difusão para o processo de difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica, medido após a difusão de fósforo.

Análise do perfil de fósforo

Os resultados da resistência de folha do emissor de fósforo, da concentração em superfície de fósforo e da profundidade de junção em função da temperatura de difusão de boro são mostrados na Tabela 2.

T_B (°C)	$R_{\square P}$ (Ω/\square)	C_s ($\times 10^{21}$ átomos/cm ³)	x_j (μm)
1000	60 ± 4	1,1	0,36
990	41 ± 9	1,0	0,34
980	61 ± 4	1,2	0,36
970	57 ± 7	1,5	0,34
960	63 ± 6	0,9	0,36
950	60 ± 4	1,1	0,37
940	58 ± 4	1,7	0,36
930	59 ± 3	1,1	0,36

Tabela 2: Resistência de folha do emissor de fósforo, concentração do dopante em superfície e profundidade da junção para diferentes temperaturas de difusão de boro.

A difusão de fósforo com POCl₃ foi realizada em forno convencional com a temperatura de 845 °C, seguida de um recozimento. A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que a

resistência de folha variou de $58 \Omega/$ a $63 \Omega/$ e não apresenta uma relação com o aumento da temperatura de boro, indicando que não ocorreu a difusão de boro na face em que ocorria a difusão de fósforo e que o óxido crescido na face com boro foi eficaz em evitar que átomos de boro fossem arrancados pelos gases no ambiente do forno durante a difusão de fósforo. Também se verifica que o desvio padrão é maior que o valor apresentado na Tabela 1, para a difusão de boro. Portanto, neste caso, a difusão de fósforo é menos uniforme. Para o emissor, verifica-se que para a maioria dos processos a concentração de fósforo na superfície apresentou valores de $0,9 \times 10^{21}$ a $1,2 \times 10^{21}$ átomos/cm³, que são valores característicos quando a fonte de fósforo é o POCl₃. Somente os valores de C_S para a T_B de 940 °C e 970 °C foram um pouco maiores, como se pode ver na Figura 8. Da mesma forma que a C_S, a profundidade da junção não foi influenciada pela temperatura de difusão de boro, visto que os valores variaram de 0,34 μm a 0,36 μm, como mostra a Figura 8.

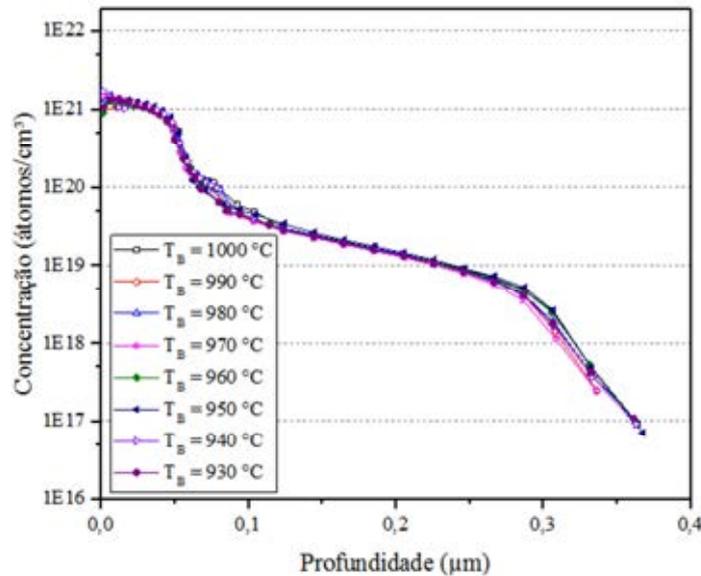


Figura 8: Perfil de dopagem de fósforo para a mesma temperatura de difusão de fósforo mas diferentes temperaturas de difusão de boro.

Caracterização da célula solar

A partir da otimização da difusão de boro e um processo previamente desenvolvido foram processadas células solares (Zanescio et al. 2018). Constatou-se que a temperatura de difusão de boro de 970 °C resultou na maior eficiência das células solares (Crestani et al. 2016^a). Neste caso, a resistência de folha do campo retrodifusor de boro foi de $(43,2 \pm 1,7) \Omega/$, com concentração em superfície do dopante e profundidade do BSF de $3,8 \times 10^{19}$ átomos/cm³ e de 0,9 μm, respectivamente.

Na Tabela 3 mostra-se a tensão de circuito aberto, a densidade de corrente de curto-circuito, o fator de forma e a eficiência das células solares com passivação com SiO₂ em ambas as faces e filme antirreflexo de dióxido de titânio otimizado em função da espessura da camada de SiO₂ na face frontal. Como resultado das otimizações obteve-se um valor elevado da densidade de corrente de curto-circuito, que foi de $(36,4 \pm 0,2) \text{ mA/cm}^2$. A eficiência média das células solares foi de $(16,9 \pm 0,3) \%$ e o fator de forma alcançou o valor de $(0,78 \pm 0,02)$. Devido a boa passivação, que reduz a recombinação dos portadores de carga minoritários nas superfícies, a tensão de circuito aberto média foi de $(596,6 \pm 2,6) \text{ mV}$.

Célula	V _{OC} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	η (%)
6 – 1	598,2	36,5	0,790	17,2
6 – 2	599,8	36,5	0,744	16,3
6 – 3	594,4	36,1	0,792	17,0
6 – 4	599,2	36,5	0,792	17,3
6 – 6	594,5	36,2	0,790	17,0
6 – 7	596,7	36,5	0,769	16,7

6 – 9	593,2	36,3	0,785	16,9
Média	596,6 ± 2,6	36,4 ± 0,2	0,78 ± 0,02	16,9 ± 0,3

Tabela 3: Tensão de circuito aberto, densidade de corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência das células solares processadas em lâminas de Si-Cz, tipo p, grau solar, com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio otimizado e com passivação com SiO₂.

A Figura 9 apresenta a curva de densidade de corrente em função da tensão elétrica da célula solar com maior eficiência desenvolvida no Brasil. Este dispositivo alcançou a eficiência de 17,3 % e é um pouco menor que a eficiência média dos dispositivos produzidos pela indústria, que é da ordem de 17,8 % (Battaglia et al. 2016). Pode-se observar que ocorre um acréscimo na corrente elétrica com o aumento da tensão aplicada a partir da tensão de aproximadamente 0,15 V. Provavelmente, produziu-se um dispositivo similar à um diodo associado à célula solar, devido ao método de difusão dos dopantes. Este fenômeno limitou a corrente de curto-circuito, que poderia ser maior, e será estudado em trabalhos futuros.

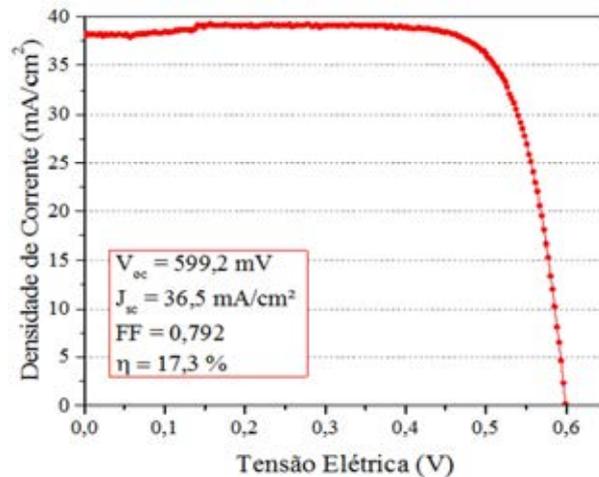


Figura 9: Curva J-V da célula solar de maior eficiência desenvolvida no Brasil com campo retrodifusor seletivo e emissor passivados com SiO₂.

A eficiência quântica interna (EQI) é uma medida para avaliar o efeito da passivação da célula solar. Por exemplo, se a passivação é mais eficaz no emissor frontal, reduzindo a recombinação dos portadores de carga, a EQI será maior para comprimentos de onda menores, entre 0,3 μm e 0,5 μm. Na Figura 10 apresenta-se a eficiência quântica interna e a refletância da célula solar com a maior eficiência.

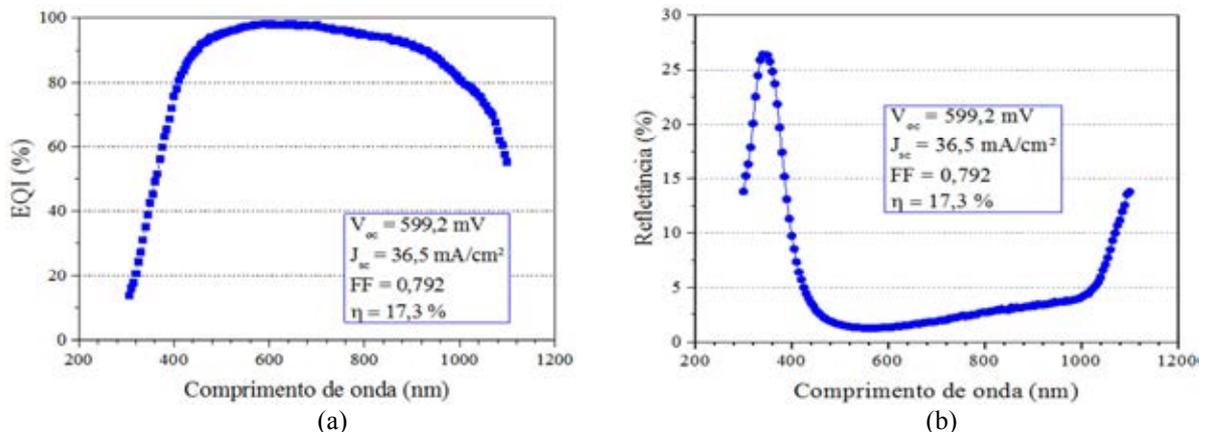


Figura 10: (a) Eficiência quântica interna e (b) refletância da célula solar com maior eficiência desenvolvida a partir da otimização do BSF de boro e filme antirreflexo de TiO₂ depositado sobre a camada passivadora de SiO₂.

Da Figura 10-a nota-se que para comprimentos de onda próximos a 600 nm, a EQI apresenta o maior valor, próximo de 100 %, que é o valor máximo. Também se verifica que a camada de SiO₂ de 10 nm crescida no campo retrodifusor de boro não foi eficaz para passivar a superfície, pois para comprimentos de onda maiores que 0,8 μm observa-se uma redução da EQI. Com relação a refletância mostrada na Figura 10-b, pode-se ver que o mínimo da refletância ocorre para comprimentos de onda próximos a 550 nm, onde ocorre a maior EQI. A refletância média ponderada (Zhao e Green, 1991) foi de 2,9 % para esses dispositivos e foi medida em amostras sem metalização.

CONCLUSÃO

Com a avaliação da concentração de boro em função da profundidade e o método proposto com a técnica de *spin-on* e redução de etapas de processamento concluiu-se que o óxido de silício crescida na mesma etapa térmica que a difusão de boro foi eficaz em evitar a difusão de fósforo na face previamente dopada com boro. Verificou-se que a concentração em superfície de boro aumentou com o aumento da temperatura de difusão, variando de aproximadamente 3,0x10¹⁹ a 5,0x10¹⁹ átomos/cm³. Da mesma forma, a profundidade do campo retrodifusor variou de 0,6 μm a 1,3 μm, com o aumento da T_B de 930 °C a 1000 °C. Também se observou-se que ocorreu uma redução da concentração de boro na superfície, devido a segregação do boro para a camada de SiO₂.

Constatou-se que a resistência de folha do emissor de fósforo variou de 58 Ω/ a 63 Ω/ e não apresentou uma relação com o aumento da temperatura de boro, indicando que não ocorreu a difusão de boro na face em que ocorreu a difusão de fósforo. Também se verificou que o desvio padrão da resistência de folha do emissor foi maior que o valor obtido com a difusão de boro. A concentração de fósforo na superfície e a profundidade da junção não foram influenciadas pela temperatura de difusão de boro, confirmando que não ocorreu difusão de boro na face com difusão de fósforo.

Foram processadas células solares com a temperatura de difusão de boro de 970 °C e alcançou-se a eficiência de 17,3 %, que é a maior eficiência de células solares produzidas no Brasil. Também se verificou que a camada de SiO₂ de 10 nm crescida no campo retrodifusor de boro não foi eficaz para passivar a superfície.

REFERENCIAS

- Battaglia, C., Cuevas, A., and Wolf, S. D. (2016). High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. *Energy Environ. Sci.*, 9, 1552-1576. DOI: 10.1039/c5ee03380b.
- Barth, S., Dolla, O., Koehler, I., Neckermann, K., Blech, M., Lawrenz, A., Edler, A., Kopeček, R., Schneider, J. J. (2013). 19.4 Efficient bifacial solar cell with spin-on boron diffusion. *Energy Procedia*, 38, 410-415. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.297.
- Crestani, T., Zanesco, I., Moehlecke, A., Razera, R.A.Z., Aquino, J., Model, J.C.M., Ly, M. (2016^a). Desenvolvimento do campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro em células solares de silício. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, Brasil, p. 1-8.
- Crestani, T., Zanesco, I., Moehlecke, A., Razera, R.A.Z., Aquino, J., Model, J.C.M., Ly, M. (2016^b). Influência do tempo de difusão de boro no campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro em células solares de silício. In: XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, La Plata, Argentina, 4, 04.23-04.34
- Crestani, T., Zanesco, I., Moehlecke, A. (2017). Influência da passivação em células solares de silício com campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 14, 3, 1-10, Julho/Setembro 2017. DOI:10.4322/2176-1523.1229.
- CVP21, Manual of Wafer Profiler, Electrochemical Capacitance Voltage Profiling.(2011). <http://www.wepcontrol.com/cv-profiler/>.
- Feldmann, F., Bivour, M., Reichel, C., Hermle, M., Glunz, S. W. (2014). Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics., *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 120, 270-274.
- Green, M. A. (2015). The passivated emitter and rear cell (PERC): From conception to mass production. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 143, 190-197. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.06.055.

- Hilali, M. M., Gee, J. M., Hacke, P. (2007). Bow in screen-printed back-contact industrial silicon solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, 1228-1233.
- Kern, W. (1993). *Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology*, New Jersey, Noyes Publications.
- Machala, C., Wise, R., Mercer, D., Chatterjee, A. (1997). The Role of Boron Segregation and nansient Enhanced Diffusion on Reverse Short Channel Effect. *Journal of Technology Computer Aided Design TCAD*, 1-6. DOI: 10.1109/TCAD.1996.6449171.
- Nursam, N.M., Ren ,Y., Weber, K.J. (2010). PECVD silicon nitride passivation on boron emitter: the analysis of electrostatic charge on the interface properties, *Adv. Optoelectron.* (487406), 1–8. DOI: 10.1155/2010/487406.
- Peiner, E., Schlachetzki, A., Kruger, D. (1995). Doping profile analysis in Si by electrochemical capacitance-voltage measurements. *Journal of the Electrochemical Society*, 142, 576-580.
- Photo Emission Tech Inc. (2015). Solar Cell Tester Model CT150AAA-TP & CT150AAA-EM. Disponível em: <http://www.photoemission.com/celltesters.html>. Acesso em: 26 setembro 2018.
- Singha, B., Solanki, C. S. (2017). Boron-rich layer properties formed by boron spin on dopant diffusion in n-type silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 57, 83-89. DOI: 10.1016/j.mssp.2016.09.034.
- Taon, N.N. (1999). *Spin on Glass Materials and Applications in Advanced IC Technologies* (Ph.D. thesis), International training Institute for Materials Science (ITIMS), Hanoi, Vietnam.
- Werner, S., Lohmüller, E., Saint-Cast, P., Greulich, J. M., Weber, J., Schmidt, S., Moldovan, A., Brand, A. A., Dannenberg, T., Mack, S., Wasmer, S., Demant, M., Linse, M., Ackermann, R., Wolf, A. Preu, R. (2017). Key aspects for fabrication of p-type CZ-Si PERC solar cells exceeding 22% conversion efficiency. In: 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 22-29 september 2017, Amsterdam, The Netherlands, 1-7.
- Zanescio, I., Moehlecke, A., Pinto, J. L., Ly, M. (2012). Development and Comparison of Small and Large Area Boron Doped Solar Cells in n-type and p-type Cz-Si. In: 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Austin, Texas, EUA. 1-5. DOI: 10.1109/PVSC.2012.6318054.
- Zanescio, I., Moehlecke, A. (2012^a). Desenvolvimento de tecnologias industriais de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos. Relatório Final de Projeto FINEP, Convênio FINEP 01.080635.00, ref 1359/08.
- Zanescio, I., Moehlecke, A. (2012^b). Processo de difusão de dopantes em lâminas de silício para a fabricação de células solares, BR Patent PI12 030 606, BR 10 2012 030 606 9.
- Zanescio, I., Razera, R. A. Z., Moehlecke, A. (2017). Análise da passivação com SiO₂ na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo. *Revista Matéria*, 22, 1-9. DOI: 10.1590/s1517-707620170005.0260.
- Zanescio, I., Crestani, T., Moehlecke, A., Aquino, J., Razera, R. A. Z., Model, J. C. M., Ly, M., Gonçalves, V. A. (2018). Desenvolvimento da célula solar com maior eficiência no Brasil com processo Industrial. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 17-20 abril de 2018, 1-9.
- Zhao, J., Green. M. (1991). Optomized antireflection coating for high-efficiency silicon solar cells, *IEEE transactions on Eletron Devices*, 38, 8, 1925-1934.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrosul pela subvenção do projeto de P&D intitulado "Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com Pasta de Alumínio e Passivação", Convênio ELETROSUL n° 1110140010, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMEN: Las células solares procesadas con boro se producen en la industria porque permiten el aumento de eficiencia y la difusión de boro es una etapa importante. Una alternativa a la difusión con BBr₃ es el método de *spin-on*. En este contexto, el objetivo del trabajo es analizar el perfil de boro, producido por *spin-on* y con reducción de etapas térmicas, en la formación del campo retrodifusor y en los parámetros eléctricos de celdas solares. Para reducir los pasos, la difusión de boro y la oxidación se realizaron en la misma etapa térmica. Se concluyó que el óxido de silicio fue eficaz en evitar la difusión de fósforo en la cara con boro y que ocurrió la segregación del boro para la capa de SiO₂, para

todas las temperaturas de difusión de boro (T_B) analizadas. Las celdas solares procesadas con $T_B = 970$ °C alcanzaron la eficiencia del 17,3 %, que corresponde al mayor valor de dispositivos desarrollados en Brasil.

Palabras clave: celda solar de silicio, campo retrodifusor, perfil de dopaje de boro.

ABSTRACT: The industry had been producing boron-processed solar cells due to the possibility to increase the efficiency and boron diffusion is an important step. An alternative to BBr_3 diffusion is the spin-on method. In this context, the objective of this work is to analyze the boron profile, produced by spin-on and with reduction of thermal steps, in the formation of the back surface field and in the electrical parameters of solar cells. To reduce the steps, the boron diffusion and oxidation were performed in the same thermal step. We concluded that silicon oxide was effective in avoiding the diffusion of phosphorus in the face with boron. The boron segregation occurred at the SiO_2 layer, regardless of the boron diffusion temperature (T_B). Solar cells processed with $T_B = 970$ °C achieved the efficiency of 17.3 % and this is the highest value of devices developed in Brazil.

Keywords: silicon solar cells, selective back surface field, boron profile.

VALORACIÓN ACTUALIZADA DEL POTENCIAL EÓLICO DE NEUQUÉN

S. Troncoso¹, C. Palese

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, C.P. 8300, Neuquén, Argentina

Tel. 0299-4490322 – e-mail: samueltroncoso24@gmail.com; claudia.palese@fain.uncoma.edu.ar

Recibido 09/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: Este trabajo tiene como objetivo la actualización del mapa eólico de la Provincia del Neuquén. Con el fin de proveer las bases para futuras tareas de evaluación de potenciales sitios para la instalación de parques eólicos. Se aprovechan nuevos datos de viento de excelente calidad. Se utiliza un modelo tipo diagnóstico que satisface la ecuación de conservación de la masa y que permite manejar múltiples bases de datos. La topografía y la rugosidad superficial se elaboran con datos de sensores remotos. Se obtienen mapas a 50, 80 y 100 m de altura. Se evalúa la calidad de ajuste. Se logran mapas de adecuada calidad especialmente en las direcciones de los Oestes. La Meseta Barda Negra y la Sierra del Portezuelo presentan valores de densidad de potencia media anual a 80 m de altura mayor a 800 W/m² que indica excelente posibilidad de instalación de parques eólicos.

Palabras clave: mapa eólico, modelo de conservación de la masa, densidad de potencia, recurso eólico.

INTRODUCCION

El mapeo eólico es un tipo de cartografía que proporciona una base para una estratégica toma de decisiones relacionadas a la distribución del recurso eólico y su eficaz aprovechamiento. La cuantificación del recurso posibilita avanzar en los estudios de factibilidad de proyectos para aplicaciones que incluyen la generación de energía eléctrica a escala comercial, en sistemas conectados a la red y de menor escala en sistemas aislados.

Ejemplo de mapas del potencial eólico son: de Argentina <https://sigeolico.minem.gob.ar/>, del Neuquén (Palese y otros, 2011), de Mendoza (Hualpa y Milani, 2007), de Misiones (Aires y otros, 2012) y de Río Negro (Guozden y otros, 2018).

El objetivo de este trabajo es actualizar una parte del mapa del potencial eólico de la Provincia del Neuquén. El estudio se desarrolla en el marco de un Convenio suscripto entre la Agencia de Desarrollo de Inversiones del Neuquén Sociedad del Estado de la Provincia (ADI-NQN SEP) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue.

La Agencia mencionada fijó la zona de interés, que se muestra en el Figura 4 y que tiene 600.000 habitantes, aproximadamente, abarca 42.390 km² y cuenta con líneas de transporte de energía eléctrica de media y alta tensión correspondientes al Sistema Argentino de Interconexión (SADI). Para lograr el objetivo planteado se utilizaron datos medidos de vientos obtenidos del Plan Eólico de la ADI-NQN SEP.

La actualización del mapa eólico permitirá contar con una herramienta básica para la elaboración de planes de desarrollo del recurso eólico, facilitar el análisis técnico económico de las distintas alternativas de abastecimiento energético, constituyéndose en un soporte para la toma de decisiones, identificar áreas potencialmente aptas para el desarrollo de proyectos y el diseño de estudios o programas de evaluación del recurso en sitios específicos.

¹ Trabajo final de la carrera de Ingeniería Eléctrica –UNComa-

METODOLOGIA

La valoración del recurso eólico se realiza con un modelo numérico de simulación atmosférica que incorpora un sistema de información geográfica. El modelo satisface la ecuación de conservación de la masa y calcula el campo de velocidad del viento (*Vector V**) que se desvía la mínima cantidad posible de un campo de viento inicial derivado de datos observados (*Vector V*). El ajuste necesario para lograr cero divergencia (Ec. (2)) se determina mediante la resolución iterativa de un conjunto de ecuaciones en diferenciales parciales. Para ello se establece una malla de elementos finitos a lo largo de la región de interés.

Si se denominan $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ a las componentes de velocidad de Oeste a Este, de Sur a Norte y hacia arriba, el modelo propone un *vector* $V^* = (u^*(x, y, z); v^*(x, y, z); w^*(x, y, z))$ que minimiza el *funcional* J definido como:

$$J = \iiint_V [\alpha_1 (u^* - u)^2 + \alpha_2 (v^* - v)^2 + \alpha_3 (w^* - w)^2] dx dy dz \quad (1)$$

Restringido a:

$$\text{div}V^* = \frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

En el cual $V = (u(x, y, z); v(x, y, z); w(x, y, z))$ es el campo de viento medido; α_i son módulos de precisión. Para tener en cuenta la estratificación atmosférica y la desviación respecto a las condiciones de estabilidad neutra se afecta la ecuación de trabajo con coeficientes de corrección.

El procedimiento utiliza aproximaciones matemáticas para resolver el campo de velocidades sin la necesidad de utilizar ecuaciones de transporte como las ecuaciones de Navier-Stokes. El resultado de este modelo es adecuado y requiere un menor esfuerzo computacional y se muestra a través de mapas de la distribución sobre el terreno del viento y de la densidad de potencia eólica a distintos niveles de altura sobre el nivel del suelo.

Como la orografía, el resguardo producido por obstáculos y la rugosidad superficial del terreno son, entre otros, factores que afectan el viento, el modelo utiliza mapas digitales de topografía y de rugosidad superficial conjuntamente con datos de viento medidos. En la Figura 1 se muestra en forma de diagrama los pasos metodológicos seguidos en este trabajo y a continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

Dominio de análisis

El dominio abarca el área comprendida entre $37^\circ 55' S - 40^\circ 36' S$ en la dirección norte - sur y $67^\circ 58' O - 71^\circ 09' O$ en la dirección este - oeste (sombreado azul en la Figura 4). La malla tiene 638 nodos en el "eje x", 700 nodos en el "eje y" y 15 niveles de altura en el eje σ (eje vertical conforme al terreno). La resolución espacial horizontal es de 423 metros. El dominio abarca y excede el área de interés de la ADI-NQN SEP (sombreado verde en la Figura 4).

Mapa digital de topografía

Los datos orográficos se descargaron del sitio web del Servicio Geológico U.S. Geological Survey y tienen una resolución espacial horizontal de un segundo de arco. Por medio de una transformación se rectificaron a la resolución y dimensiones del dominio de análisis. En la Figura 2 se muestra el modelo digital de elevación utilizado. El sistema de referencia es Gauss-Krüger Argentina.

Mapa digital de rugosidad aerodinámica superficial media anual

Para su obtención se usa una metodología indirecta basada en datos satelitales de los canales reflectivos del sensor ETM+/Landsat7. A cada uso/cobertura del suelo en que fue clasificada la escena satelital se lo asocia con un valor de rugosidad aerodinámica superficial (z_0) según Spera (1999) y Stull (1988). La Tabla 1 describe en la característica uso/cobertura del suelo y el valor z_0

asignado. El resultado se observa en la Figura 3 que muestra los valores medios anuales.

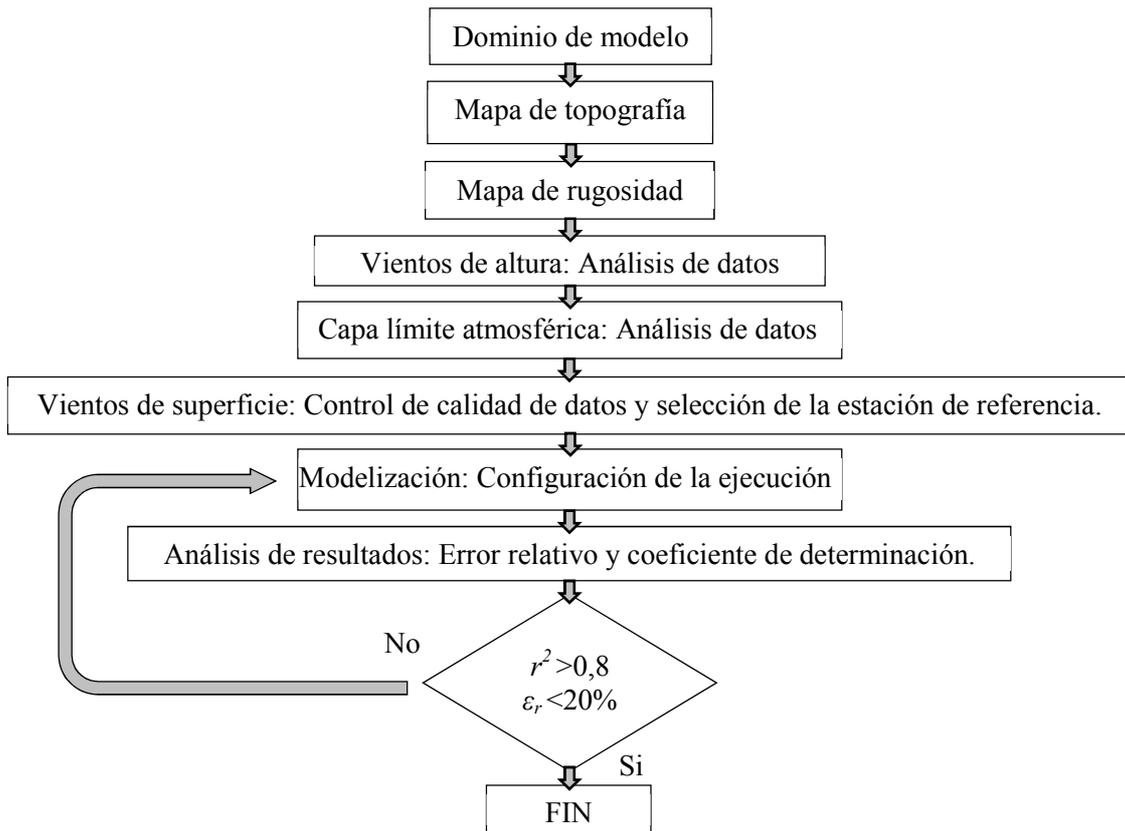


Figura 1: Diagrama de flujo que resume la metodología utilizada.

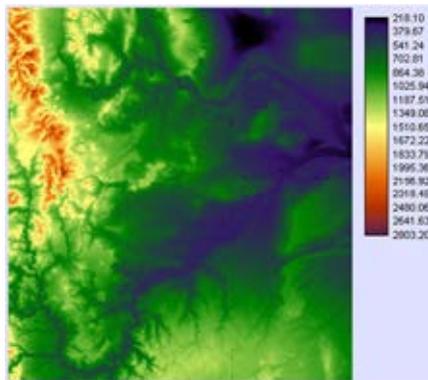


Figura 2: Mapa digital de la topografía con elevaciones expresadas en m.s.n.m..

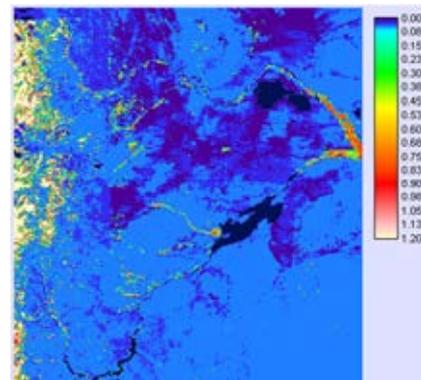


Figura 3: Mapa digital de z0 media anual expresada en metros.

Descripción	z_0 [m]
Agua	0,0009
Suelo desnudo	0,005
Vegetación herbácea baja y dispersa	0,05
Ciudad	0,4
Bosque caducifolio	0,8
Bosque perenne	1,2

Tabla 1: Rugosidad aerodinámica superficial, z_0 , correspondientes al mapa de la Figura 3.

Datos de viento de altura

La velocidad y la dirección del viento geostrófico se descargaron del Global Data Assimilation System (GDAS/NOAA). Corresponden a datos derivados de un modelo atmosférico. Se utilizó un período de 5 años (2000 – 2004). Los datos de viento son estimaciones cada 6 horas que corresponden a la

velocidad y dirección del viento a 810 m, 1.510 m y 3.090 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Estos datos son de una posición central y válidos para todo el dominio. Esta posición está indicada mediante un marcador color turquesa en la Figura 4.

	810 m.s.n.m.	1.510 m.s.n.m.	3.090 m.s.n.m.
Dirección más frecuente (frecuencia)	240 ° (25,7 %)	270 ° (25,8 %)	270 ° (31,6 %)
Velocidad media anual	5,8 m/s	9,6 m/s	12,8 m/s
Vientos más fuertes (dirección)	7,4 m/s (270°)	12,2 m/s (270°)	15,2 m/s (270°)

Tabla 2: Características de los vientos de altura en la región de estudio.

Como se observa en la Tabla 2 los vientos más frecuentes son del sudoeste (240°) en el nivel más bajo y rotan al oeste (270°) en los niveles superiores. El incremento vertical de la intensidad del viento, en promedio, es 0,004 (m/s)/m, este dato se utiliza en las interpolaciones verticales del modelo. En el análisis direccional los vientos más intensos son los oestes cuyas velocidades varían entre 7,4 y 15,2 m/s en las tres alturas.

Datos de la capa límite atmosférica

De acuerdo al tipo de estabilidad, el modelo estima los perfiles verticales del viento en la subcapa superficial de la capa límite atmosférica. Ésta estabilidad se indica con la longitud de Monin-Obukhov, L , que depende de la velocidad del viento, la rugosidad superficial y del flujo de calor.

La altura de la capa límite atmosférica, la altura de la subcapa de superficie y la longitud L en este trabajo se determinan como un promedio anual para la posición central del dominio (marcador color turquesa en la Figura 4).

Con los datos del sistema GDAS/NOAA se obtiene que la altura de la capa límite atmosférica está a 663 metros sobre el nivel del suelo (m.s.n.s.), la altura de la subcapa de superficie a 170 m.s.n.s., la estabilidad atmosférica más frecuente, en el 57% del año, es la del tipo neutral ($L \gg 200$ metros), el 33% es estable y el 10% es inestable.

Datos de viento de superficie

Para representar adecuadamente las características del flujo a través de la región analizada es importante tener una red de estaciones de medición densa, por ello, en este trabajo no sólo se utilizaron los datos proporcionados por la ADI-NQN SEP, que brindan actualidad de la información, sino también aquellos incluidos en la elaboración del mapa del potencial eólico provincial anterior.

Se ha tenido cuidado en la exactitud de los datos, por ello, se realiza un estricto control de calidad de las bases de datos medidos de velocidad (V) y de dirección (D) con el objetivo de identificar todo aquel registro incorrecto. Esta tarea incluyó el re-análisis de las bases de datos utilizadas con anterioridad y el análisis de las nuevas, con los siguientes criterios:

- Rango de validez de las velocidades, $0 \text{ m/s} \leq V \leq 52 \text{ m/s}$,
- Rango de validez de las direcciones, $0^\circ \leq D < 360^\circ$,
- Verificación de D cuando $V = 0 \text{ m/s}$,
- Persistencia de un valor de V o Calma ($V = 0 \text{ m/s}$) por periodos prolongados,
- Persistencia de un valor de D por periodos prolongados,
- Corrección por interferencia de la torre según metodología sugerida en Mattio y Tilca (2009) en las cinco estaciones de la ADI-NQN S.E.P.,
- Análisis estadístico y su comparación con las características eólicas de la región.

Cuando se detectó un error se eliminó el registro completo.

En la Figura 4 (marcadores con letras) se señalan las posiciones y en la Tabla 3 se muestra la disponibilidad de datos e información de cada una de las torres de medición. Se destacan las bases de datos de los Aeropuertos Neuquén y Chapelco (E y K) debido a los periodos prolongados de 31 y 21 años, respectivamente. Por otra parte, las últimas cinco (N a R) se distinguen por las mediciones a

varios niveles de altura.

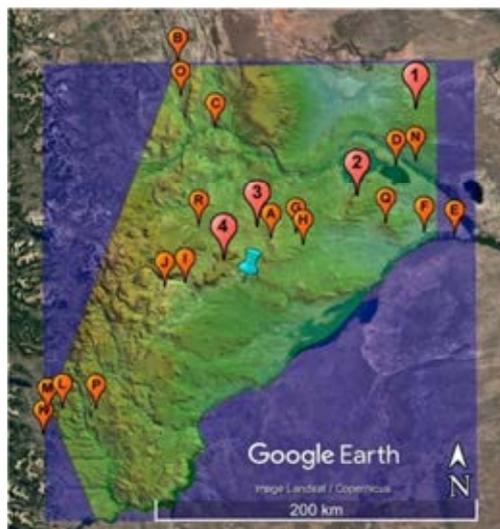


Figura 4: Dominio completo del modelo (sombreado azul) y región de interés de la ADI-NQN S.E.P. (sombreado verde). Los marcadores con letras indican la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas. Marcador color turquesa: posición correspondiente a los datos de viento de la atmósfera superior y de la capa límite atmosférica. Los marcadores con números muestran los lugares con buenos niveles de densidad de potencia ($DP \geq 500 \text{ W/m}^2$) cuya descripción está en la Tabla 7.

	Elevación [m.s.n.m.]	Altura [m.s.n.s.]	Periodo [años]	Frecuencia [min]	Tasa de datos útiles [%]	Fuente
A	946	30	1,5	60	69,01	COPELCO
B	1.189	10; 30	3,6	10	99,83; 99,93	EPEN
C	593	10	2/3	10	98,41	EPEN
D	415	4	5/6	15	93,36	L DFA
E	272	10	31	60	71,35	SMN
F	307	2,5	2 1/6	10	97,85	CAPEX
G	659	10	5,3	180	45,16	SPRH
H	701	35	2 1/6	60	85,95	COPELCO
I	811	10	1,75	60	93,88	EPEN
J	852	18	1 1/3	60	92,35	EPEN
K	789	10	21	60	35,57	SMN
L	1.073	26	1	10	97,53	EPEN
M	784	10	9,4	1.440	92,2	EPET N°4
N	286	40; 60; 80	1 2/3	10	94,49; 94,49; 94,49	ADI-NQN
O	868	40; 60; 80; 82	2	10	97,08; 97,03; 97,03; 95,97	ADI-NQN
P	999	40; 60; 80; 82	1	10	100; 100; 94,2; 100	ADI-NQN
Q	696	40; 60; 84	2	10	99,05; 99,06; 95,7	ADI-NQN
R	1.033	20; 40; 60	2	10	99,8; 99,87; 99,73	ADI-NQN

Tabla 3: Estaciones meteorológicas utilizadas. Se detallan las referencias de la Figura 4, elevación respecto del nivel del mar, altura de los sensores respecto del nivel del suelo, periodo de medición, frecuencia de medición, tasa de datos útiles y la Institución que brindó la información. COPELCO:

Cooperativa Eléctrica de Cutral Có, EPEN: Ente Provincial de Energía del Neuquén, L DFA: Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales (FI-UNCOMA), SMN: Servicio Meteorológico Nacional, CAPEX: Central Térmica Capex, SPRH: Secretaría Provincial de Recursos Hídricos del Neuquén, EPET: Escuela Provincial de Enseñanza Técnica, ADI-NQN S.E.P.: Agencia de Desarrollo de Inversiones del Neuquén.

Estación meteorológica de referencia

La estación de referencia define las frecuencias de ocurrencia para cada sector de dirección y por lo tanto, las medidas que el modelo utiliza para promediar el campo de viento final. Como se la utiliza para todo el dominio debe ser representativa. Para su selección se usaron los siguientes criterios:

- ✓ Distribución de frecuencia de la dirección representativa del clima eólico del dominio,
- ✓ Mediciones a alta frecuencia (≤ 10 minutos), las 24 horas del día y en un periodo prolongado (≥ 2 años),
- ✓ Con mediciones de buena calidad, con sensores calibrados y homologados,
- ✓ Ubicación centrada en el dominio, bien expuesta al clima eólico local (no en valle o en colina y sin obstáculos cercanos).

Bajo los criterios arriba mencionados se seleccionó la estación de Subida del Capo a 40 m (R en Figura 4 y Tabla 3) cuyos vientos predominantes provienen de las direcciones oeste y oeste-noroeste (Figura 5 (izq.)), que suman una ocurrencia de 42 % del año. También los vientos de estas direcciones son los más fuertes, del oeste (270°) a 9,62 m/s y del oeste-noroeste (300°) a 10,08 m/s, como se observa en la Figura 5 (der.).

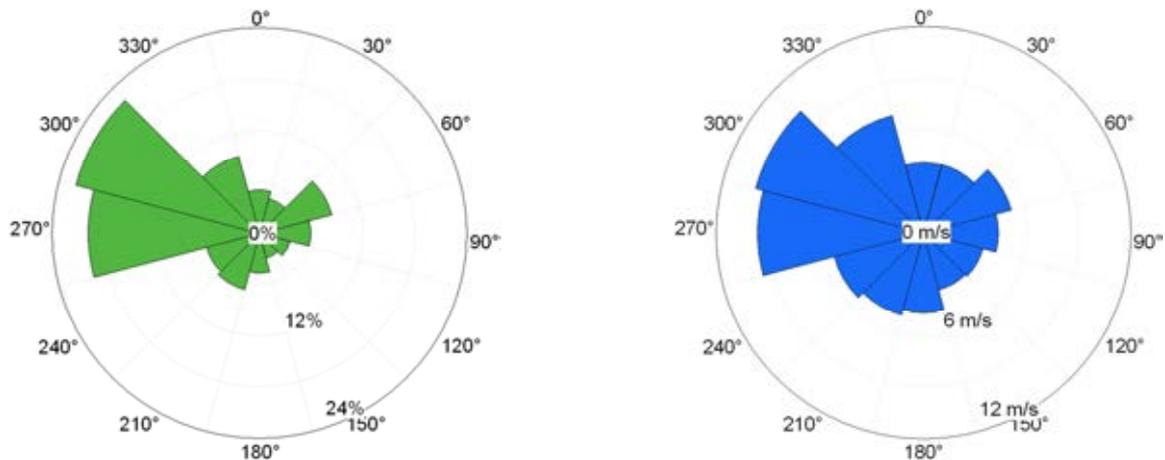


Figura 5: Estación meteorológica de referencia Subida del Capo a 40 m.s.n.s. (R en Figura 4) (izq.) Distribución de frecuencias de la dirección del viento. (der.) Distribución de velocidades medias por dirección.

Caracterización del recurso eólico

Se realiza mediante la determinación de la función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento y de la densidad de potencia eólica.

La función de densidad de probabilidad de Weibull, $f(V)$, es:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

donde, v es la velocidad del viento, k es el parámetro de forma y c es el parámetro de escala. En la Figura 6 (izq.) se grafican las $f(V)$ de cuatro direcciones del viento de la estación meteorológica de referencia y se incluyen los parámetros de forma, de escala y la velocidad media anual por dirección. Cuando los vientos provienen de las direcciones norte, este y sur tienen, en promedio, alta frecuencia de ocurrencia las velocidades mayores a 2,0 m/s y menores e iguales a 4,0 m/s; cuando provienen del oeste la mayor ocurrencia es de vientos con velocidades mayores a 7,0 m/s y menores e iguales a 8,0 m/s.

La densidad de potencia eólica, DP , depende de la velocidad del viento, v_i , de la densidad del aire, ρ , y de la función de probabilidad de la velocidad del viento, $f(v_i)$, de la forma:

$$DP = \frac{P}{A} = \sum \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i^3 \cdot f(v_i) \quad (4)$$

La Figura 6 (der.) presenta la DP de la estación meteorológica de referencia. Se observa que las velocidades mayores a 12,0 m/s y menores e iguales a 14,0 m/s muestran la más alta DP , 35 W/m². El valor total del período anual es 488,88 W/m².

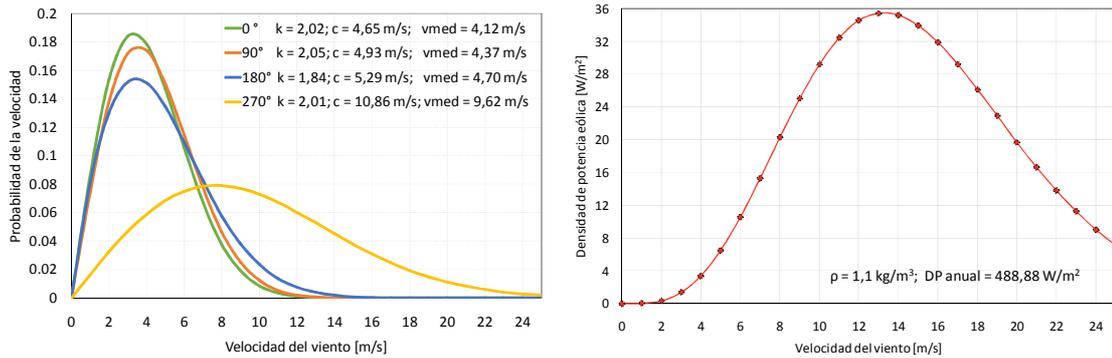


Figura 6: Estación meteorológica de referencia Subida del Capo a 40 m.s.n.s. (R en Figura 4) (izq.) Distribución de probabilidad de la velocidad del viento media anual en las direcciones norte (0°), este (90°), sur (180°) y oeste (270°). (der.) Distribución de la densidad de potencia eólica según la velocidad del viento, V_i .

Configuración inicial del modelo

Se fijó un intervalo de clase de 30° para la dirección del viento, de este modo los cálculos se determinan en 12 sectores de dirección.

Se estableció que la densidad del aire se ajuste por la elevación utilizando el perfil vertical estándar de la temperatura del aire.

Se determinó que la inicialización se efectúe con los datos de vientos de superficie con un radio de representatividad de las mediciones de 500 m.

Se exigió que el proceso iterativo finalice cuando se tenga un máximo residuo en la divergencia del campo de velocidades de 1×10^{-5} 1/s o se lleguen a las 100.000 iteraciones.

Para lograr mejores resultados se pidió que coincidan los datos de superficie con una tolerancia de 5% y que optimice la relación de estabilidad atmosférica con tolerancia de 5%.

Evaluación de la precisión de los resultados

Se efectúa mediante el cálculo direccional del error relativo porcentual, ϵ_r , y del coeficiente de determinación, r^2 , entre las velocidades medidas y las que resultaron de la simulación. Se consideran que los resultados son representativos si $\epsilon_r \leq 20\%$ en la estimación de la velocidad media general y $\epsilon_r \leq 10\%$ en las velocidades medias de las direcciones más frecuentes y energéticas. Además, debe ser $r^2 \geq 0,80$.

Se realizan varias simulaciones con cambios en la configuración e inicialización del modelo. De cada una de ellas se evalúa la concordancia entre los resultados y los datos medidos con los cálculos de ϵ_r y r^2 en cada uno de los 12 sectores de dirección del viento. Luego, se establece de cada simulación la frecuencia en que se produjeron bajos errores, $\epsilon_r \leq 1\%$, y altos errores, $\epsilon_r \geq 10\%$. Se escoge la ejecución que presenta más veces errores de bajo valor, menos veces de alto valor y alto coeficiente de determinación.

La validación de los resultados se realiza con una simulación sin incorporar en la inicialización del modelo ni en la ejecución final los datos de velocidad y dirección de una estación de medición, a la que llamamos *Estación Testigo*. La finalidad es comparar las velocidades medidas con los valores hallados en su posición. La medición en Cerro Bandera, que tiene la etiqueta A en la Figura 4, fue seleccionada como *Estación Testigo* dada su posición casi central en el dominio. Como las mediciones son a 30 m.s.n.s. se efectúa una nueva ejecución a esta altura. Una vez obtenidos los valores direccionales de velocidad en la posición se calculan los coeficientes de determinación y de correlación para medir la bondad del resultado.

Datos de salida

Los resultados del modelo son de dos tipos: uno consiste en una matriz de datos que contiene, de la totalidad de los nodos de la malla y por cada par coordenado, la velocidad media anual, v , la densidad de potencia media anual, DP , y de cada uno de los 12 sectores del viento, la frecuencia, la velocidad media y el parámetro de forma, k , de la función de Weibull, $f(v)$, d. Por otro lado, también se obtienen los mapas digitales con la distribución de la velocidad y la densidad de potencia de la región.

Estos resultados corresponden a 50, 80 y 100 metros de altura. Esta elección se fundamentó en que el nivel de 50 m se utilice para la comparación con el mapa del potencial eólico provincial existente, el nivel de 80 m para compararlo con el mapa elaborado por AWS Truepower (2015), y el de 100 m porque es la altura que se analiza para la instalación de aerogeneradores de gran potencia.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Precisión lograda

Se realizan 9 simulaciones logrando un buen ajuste en la de mejor precisión, $r^2 = 0,88$, considerando todas las mediciones y todas las direcciones del viento. Además, en las direcciones más frecuentes (los Oestes) es $r^2 > 0,97$.

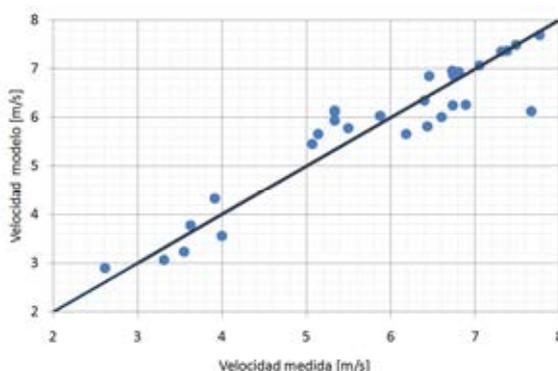


Figura 7: Velocidad modelada vs medida de cada estación (todas las direcciones) y recta identidad.

La Figura 7 muestra el ajuste alcanzado entre los datos de velocidad simulada por el modelo versus los datos medidos de cada estación (todas las direcciones). En ella se observa que hay más valores por arriba de la recta de identidad que por debajo indicando que la simulación sobreestima las mediciones. El valor más distante a la recta identidad corresponde a la torre de medición ubicada en Junín de los Andes (marcador L en la Figura 4 y la Tabla 3). Esta diferencia en la velocidad media anual no se observa cuando se hace el análisis detallado por dirección. Los errores direccionales en este sitio varían entre 0,23 % y 9,25 %, este último en la dirección sur debido al efecto topográfico.

El valor absoluto del error relativo porcentual entre las velocidades medias medida y simulada es menor a 7 %. En la Figura 8 (a) se observa que hay variación entre 0,11 % en Subida del Capo (R60m) y 20,06 % en Junín de los Andes (L26m). En las direcciones más frecuentes (210° a 270°) los errores individuales por estación de medición no superan 12 % (figura no mostrada) y los errores generales promedio de todas las estaciones son inferiores a 3,2 % (Figura 8 (b)).

Precisión lograda en la Estación Testigo

La Figura 9 muestra el ajuste alcanzado entre las velocidades simulada y medida en la posición de la *Estación Testigo* (A: Co. Bandera 30 m.s.n.s.) según las direcciones del viento. El coeficiente de correlación es 93,6 % y $r^2 = 0,875$. La simulación sobreestima las mediciones, sin embargo, la simulación representa adecuadamente el clima eólico local. Las diferencias, en promedio, entre los resultados del modelo en esa ubicación y las mediciones son más grandes (1,3 m/s) que las obtenidas cuando la estación es incluida en la simulación (0,1 m/s). El principal factor en este hecho se debe a que las mediciones corresponden a una ubicación puntual mientras que la velocidad simulada por el modelo representa un área de 423 m x 423 m (178929 m²). Además, hay una incertidumbre relacionada con la posición geográfica de la *Estación Testigo* y su exacta posición en el mapa del potencial eólico hallado.

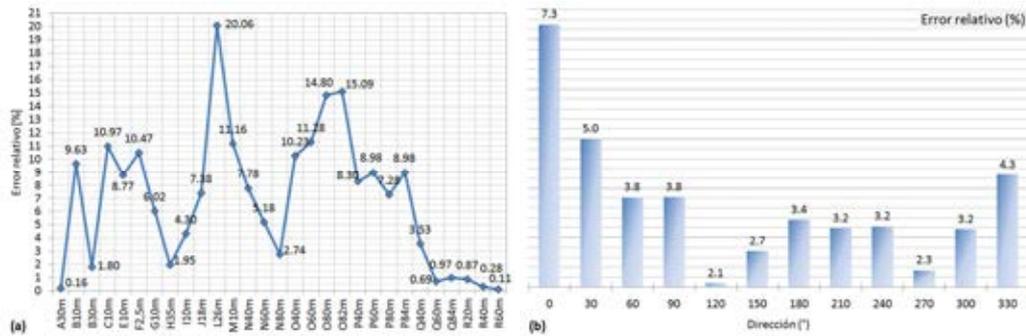


Figura 8: Errores relativos porcentuales(a) por lugar de medición; (b) por dirección del viento.

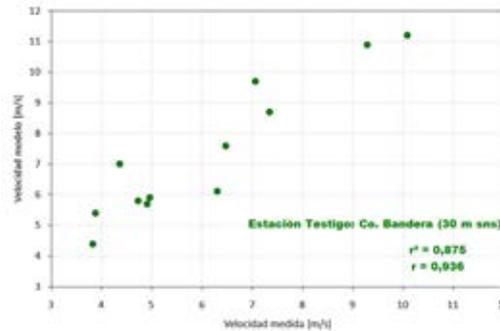


Figura 9: Velocidad medida vs velocidad modelada en la posición de la Estación Testigo que no fue incluida en ninguna etapa de la simulación.

Mapas de viento

En la Figura 10 se muestra el resultado del mapa de la velocidad media anual a 80 m.s.n.s. del área de interés. Los mapas a 50 y 100 m presentan características similares, por lo que no son mostrados en este manuscrito.

Altura sobre el nivel del suelo [m]	Velocidad media anual [m/s] (Densidad de potencia media anual [W/m ²])	
	Mínima	Máxima
50	3,38 (60,00)	12,78 (4050,35)
80	3,69 (89,94)	13,46 (4446,96)
100	3,80 (93,45)	13,81 (4622,52)

Tabla 4: Valores mínimos y máximos de velocidad media anual y entre paréntesis de la densidad de potencia media anual, simulados a 50, 80 y 100 m.s.n.s..

Rangos de velocidad [m/s]	(0 - 5]	(5 - 6]	(6 - 7]	(7 - 8]	(8 - 9]	(9 - 14]
Porcentaje de la superficie total [%]	8,9	28,0	35,6	19,9	6,2	1,3

Tabla 5: Porcentaje de superficie que ocupa cada rango de velocidades en el mapa a 80 m.s.n.s..

La Tabla 4 exhibe los valores mínimos y máximos de la velocidad media anual que hay en cada uno de los mapas simulados. Las posiciones donde se producen estos extremos coinciden en los tres niveles. La Tabla 5 detalla el porcentaje de superficie de cada rango de velocidades a 80 m.s.n.s.. Se observa que 84 % de la superficie tiene velocidades entre $5,0 \text{ m/s} < V \leq 8,0 \text{ m/s}$.

Mapas de densidad de potencia eólica

En la distribución de la densidad de potencia media anual a 80 m.s.n.s. de la Figura 11 se observan valores menores a 200 W/m^2 en los terrenos bajos como la Cuenca del Añelo en el norte del dominio y valores mayores a 2000 W/m^2 en áreas altas como las correspondientes a las Sierras de Chachil y de Catán Lil en el centro-oeste del dominio. Los mapas a 50 y 100 m.s.n.s. tienen características similares. Los valores extremos en cada altura de la simulación están incluidos entre paréntesis en la Tabla 4.

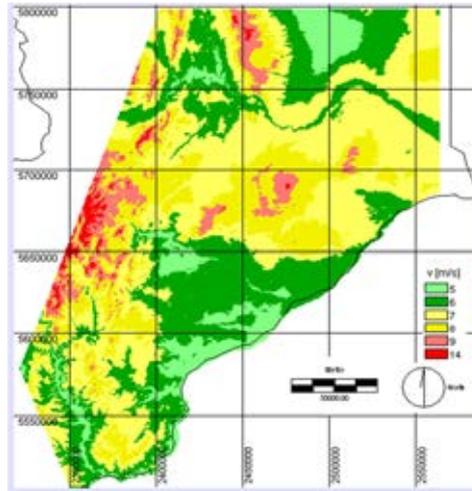


Figura 10: Mapa de la velocidad media anual a 80 m.s.n.s..

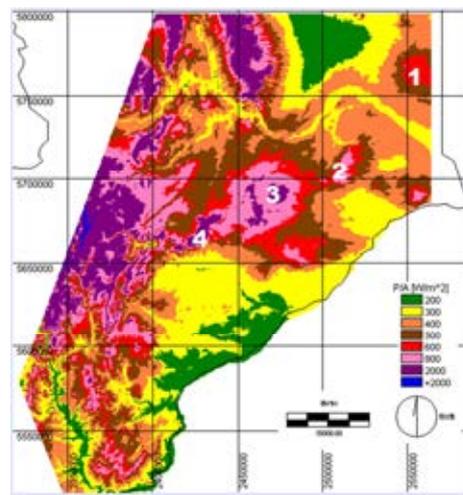


Figura 11: Mapa de la densidad de potencia anual a 80 m.s.n.s.. 1 - Sierra Piedra Blanca; 2 - Sierra Barrosa; 3 - Sierra del Portezuelo; 4 - Meseta Barda Negra.

La Tabla 6 señala el porcentaje de superficie respecto del área total estudiada de cada clase de densidad de potencia a 80 m.s.n.s.. Se observa que 26,3 % de la superficie tiene densidad de potencia eólica cuya viabilidad es buena o mayor (clases 4 a 7).

Clase	Viabilidad	Velocidad del viento [m/s]	Densidad de Potencia [W/m ²]	Porcentaje de superficie [%]	Superficie [km ²]
1	Nula	0 - 5,9	0 - 250	21,1	9.057
2	Mala	5,9 - 6,8	250 - 350	23,0	9.851
3	Marginal	6,8 - 7,5	350 - 500	24,8	10.615
4	Buena	7,5 - 8,0	500 - 600	10,2	4.351
5	Muy buena	8,0 - 8,6	600 - 750	9,3	3.969
6	Excelente	8,9 - 9,4	750 - 1.000	6,9	2.970
7	Excepcional	> 9,4	> 1.000	4,8	2.041
			TOTAL	100,0	42.854

Tabla 6: Clases estándar de densidad de potencia eólica a 80 m.s.n.s. y superficie que ocupa cada una.

DISCUSIÓN

Los valores de la Tabla 6 son interesantes como aprovechamiento energético cuando se trata de áreas que se encuentran en una región concentrada y en cercanías de las líneas de transmisión eléctrica de

media o alta tensión del SADI. Otro factor importante es la proximidad a las rutas. En la Tabla 7 se clasifican las regiones mencionadas en la Figura 11 y se evalúa el rango de densidad de potencia, el área que representa, la distancia a la línea de transmisión de energía eléctrica y la distancia a la ruta. Se observa en el mapa de la Figura 11 que las áreas de la Meseta Barda Negra y de la Sierra del Portezuelo presentan los mejores promedios anuales de densidad de potencia eólica, con valores superan 800 W/m^2 , sin embargo, la última de éstas es la que tiene menor distancia a la línea de transmisión y a la ruta y por lo tanto, más conveniente para la instalación de un parque eólico. También presenta características muy buenas del recurso eólico la zona de la Sierra Barrosa, $DP > 600 \text{ W/m}^2$. La Sierra Piedra Blanca exhibe valores $DP > 500 \text{ W/m}^2$, siendo esta última de menor recurso pero de mejor accesibilidad.

Nº	Lugar	DP [W/m^2]	Área [km^2]	Distancia a línea [km]	Tensión de la línea [kV]	Distancia a Ruta [km]
1	Sierra Piedra Blanca	500 - 550	310	2,0	500	2,00
2	Sierra Barrosa	500 - 750	147	34,2	500	21,50
3	Sierra del Portezuelo	600 - 900	187	6,0	132	6,55
4	Meseta Barda Negra	900 - 1.000	159	20,0	132	14,00

Tabla 7: Lugares de viabilidad buena a excelente y distancia de los mismos a líneas eléctricas y rutas.

Los resultados de este trabajo se comparan con otras valoraciones disponibles del recurso eólico de la provincia del Neuquén que se muestran en la Tabla 8. Con el resultado obtenido a 50 m.s.n.s. se realiza la comparación con el Mapa del año 2006 (Palese y otros, 2011). Para ello se localizan en ambos mapas 6 lugares (no se muestran en este manuscrito) y se calcula el coeficiente de correlación entre las velocidades. El resultado da bajo coeficiente $r = 59 \%$ ($r^2 = 0,3506$). Los resultados obtenidos a 80 m.s.n.s. se comparan con el mapa del año 2015 (AWS Truepower, 2015). En este caso se seleccionan 8 lugares (no se muestran en este manuscrito), el coeficiente es $r = 94 \%$ ($r^2 = 0,88$). Las diferencias encontradas pueden deberse principalmente a las distintas resoluciones espaciales que tienen los mapas (ver Tabla 8), al tipo de dato utilizado en la inicialización del modelo y el período de los mismos. Por otra parte, la densidad de información es distinta en los tres mapas.

Mapa	Resolución espacial	Datos utilizados
Actualización Mapeo provincial (- 2018 - este trabajo)	423 m	Mediciones hasta 2016
Mapeo provincial - 2006 -	1.200 m	Mediciones hasta 2005
Wind Resource of Argentina - 2015 -	200 m	Derivados de modelos atmosféricos

Tabla 8: Características de las fuentes de información del recurso eólico en la Provincia del Neuquén utilizadas en la comparación de los resultados de este trabajo.

CONCLUSIONES

Los datos de viento utilizados provienen de torres de medición con sensores de calidad y en la mayoría de los casos hay más de 80 % de disponibilidad de los mismos. Hay mediciones de largo plazo con registros mayores a 20 años y de nuevas estaciones meteorológicas homologadas con sensores de tecnología actual. El análisis estadístico de los datos de viento muestra que éstos representan adecuadamente las características del viento de la región.

La simulación lograda sobreestima las intensidades del viento medido, sin embargo, el valor absoluto del error relativo general es 6,89 % y los oestes no superan 4 %. Las velocidades resultantes del modelado se ajustan bien a las velocidades medidas, el coeficiente de correlación general es 93 % y en los vientos del oeste se logra 98 %. La mejor precisión obtenida es en Senillosa (etiqueta Q Figura 4). La validación de los resultados efectuada comparando los valores medidos y los modelados de la *Estación Testigo* seleccionada es apropiada.

Se logran mapas del potencial eólico de la Provincia del Neuquén a 50, 80 y 100 m.s.n.s. de adecuada calidad. Los valores mínimo y máximo de velocidad se ubican en la misma zona en las tres alturas. Este hecho es provocado por la fuerte influencia que tiene la topografía en la velocidad del viento dentro de la capa límite atmosférica. El mínimo se produce en una zona resguardada por una barda

(escalón de la meseta) cerca del pueblo Los Molles y el máximo en el Cerro Chachil que tiene 2.831 m.s.n.m..

Los lugares con mejores promedios anuales de densidad de potencia que disponen del acceso a líneas de transporte de energía eléctrica del SADI y a rutas son dos. Uno es en Sierra del Portezuelo con excelentes valores de densidad de potencia y una línea de 132 kV a 6 km de distancia. El segundo, con valores menores de densidad de potencia, pero aún buenos, es en Sierra Piedra Blanca que tiene una línea de 500 kV a 2 km de distancia.

Organismos internacionales de financiación consideran las áreas de recurso eólico Clase 4 o mayores adecuadas para el desarrollo de energía eólica a escala comercial, éstas representan 31,1 % de la superficie analizada.

Esta actualización de la valoración del recurso eólico mejora en 3 veces la resolución espacial horizontal (423 metros) respecto al mapa del potencial eólico provincial existente que es de 1.200. Además, se mejora la calidad de $\varepsilon_r = 13,5$ % del mapa anterior (Palese y otros, 2011) a $\varepsilon_r = 6,89$ % en esta valoración.

Agradecimientos. A la ADI-NQN S.E.P. por los datos brindados. Este trabajo se realizó con fondos de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Comahue subsidio PI04/I227.

REFERENCIAS

- Aires M., De Bortoli M.E., Frigerio E., y Roko S.R. (2012). Estimación del potencial eólico de la provincia de Misiones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 06.09 – 06.16.
- AWS Truepower (2015). Wind Resource of Argentina. aws-dewi.ul.com, última consulta 30/07/2018.
- Guozden, T.M., Bianchi E., Solarte A., y Mulleady C. (2018). Evaluación de Recursos Eólicos en la Provincia de Río Negro (Patagonia Argentina) usando Merra Reanalysis. *Meteorológica*. En edición.
- Hualpa, F. y Milani F. (2007). Mapa eólico de la Provincia de Mendoza. Informe Técnico Proyecto J-046, Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, 60 pág.
- Mattio H. F. (2003). *Nociones Generales de Energía Eólica*. Libro digital.
- Mattio H. F. y Tilca, F. (2009). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores. CREE, INENCO, Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Energía de la Nación.
- Palese C., Mattio H., Pedro G., Warchomicka N. y Lassig J. (2011). Mapa eólico de la Provincia del Neuquén, *Revista HIDRORED Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*, 2, 3-11.
- Spera, D. A. (1994). *Wind Turbine Technology*, 393 pág. New York: ASME Press.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.

ABSTRACT

The objective of this work is to update the wind resource map of the Province of Neuquén to provide the basis for future evaluation tasks of potential sites for the installation of wind farms. New wind data of excellent quality are used. A diagnostic mass consistent model that allows managing multiple databases is used. The topography and the surface roughness were elaborated with remote sensors data. Wind resource maps were obtained at 50, 80 and 100 m above ground level. The quality of results was evaluated. Maps of adequate quality have been obtained especially in the west directions. The Barda Negra Plateau and the Sierra del Portezuelo have yearly average wind power densities at 80 m above ground level in excess of 800 W/m^2 , which indicates excellent resource for installing wind farms.

Keywords: wind map, mass consistent model, wind power density, wind power resource.

SORGO FIBROSO COMO ALTERNATIVA PARA LA INTERZAFRA AZUCARERA EN TUCUMÁN.

M. C. Cruz, G. De Boeck y D. Paz

Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). C.P. 4103- Las Talitas- Tucumán. www.eeaoc.org.ar - Tel. 0381-4521000 e-mail: mcacruz@eeaoc.org.ar

Recibido 07/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: En busca de eliminar el consumo de gas natural (GN) de un ingenio en el período de interzafra, se realizó un estudio para reemplazar este combustible por sorgo fibroso. Para ello se realizó la caracterización fisicoquímica y energética del mismo y se expuso la situación actual de un ingenio que consume 90.000 Nm³/día de GN. En el análisis se describe la situación actual del ingenio y se propone: un esquema energético renovable alternativo (EERA), que implica utilizar un combustible compuesto por 30% de sorgo fibroso + 70% de bagazo de caña de azúcar. Los valores de las propiedades fisicoquímicas y energéticas obtenidos resultaron adecuados para su uso como combustible. El EERA requiere de 391,40 t/día de combustible mezcla para reemplazar el GN, que equivale a un total de 45.490 toneladas de sorgo fibroso (979 ha), considerando el sorgo necesario para reemplazar el bagazo que se usaría durante la zafra.

Palabras claves: sorgo fibroso, combustible, inter-zafra.

INTRODUCCIÓN

Argentina es un país que depende fuertemente de los combustibles fósiles para sus requerimientos energéticos. El petróleo y el gas natural contabilizan casi el 90% de la energía consumida, siendo el gas natural la componente más importante de la matriz energética, ya que aporta más de la mitad (54%) de toda la energía primaria (Gil et al., 2015).

En Tucumán, en particular, la crisis se expresa particularmente en el período aproximado de seis meses (mayo - octubre) de la zafra azucarera y citrícola, principales actividades de la provincia. En los últimos años la demanda de gas natural ha sido mayor que el gas disponible, lo que ha generado cortes en el suministro de este fluido a las industrias locales en los meses de mayor actividad, con el consiguiente perjuicio económico para la actividad agroindustrial.

Tucumán cuenta con 15 ingenios azucareros, de los cuales solo uno de ellos genera energía eléctrica excedente para vender a la red pública. Al finalizar la zafra, algunos ingenios continúan con ciertos procesos productivos (refinación y destilerías) en la post zafra, debiendo utilizar gas natural para dichos procesos, puesto que el bagazo fue consumido en su totalidad durante la zafra.

Para ello existe en la provincia un potencial para la siembra de sorgo de alta fibra, susceptible de ser aprovechado como fuente de energía. Si bien no existen antecedentes a nivel mundial de una producción comercial significativa de este cultivo energético, expertos lo reconocen como una materia prima potencial para la generación de energía (Casen et al., 2015).

Entre los sorgos energéticos, se encuentra el sorgo fibroso o de alta fibra, que posee entre sus características más importantes una alta producción de biomasa y un buen nivel de fibras. Además este cultivo, requiere escasos recursos agroclimáticos para la obtención de altos rindes, permitiendo su incorporación en tierras marginales con problemas de napas freáticas y/o salinidad, ayudando así a la recuperación de suelos degradados, logrando además del beneficio agronómico ampliar la oferta energética de la región (Fernández González et al., 2012).

El presente estudio preliminar propone reemplazar el consumo de GN por un combustible renovable, sorgo fibroso, abasteciendo los requerimientos de un ingenio para el período de interzafra azucarera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinaciones fisicoquímicas y energéticas de sorgo fibroso para su uso como combustible.

Se analizaron 15 muestras de materiales de sorgo fibroso provenientes del predio de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), ubicado en Las Talitas, Tucumán, Argentina. En la Tabla 1 se puede ver el tipo de determinación, el equipo y el procedimiento empleado para los análisis fisicoquímicos y energéticos del sorgo fibroso.

	Determinación	Equipo	Procedimiento
Caracterización físico química.	Humedad (W)	Estufa marca ORL	Según norma ASTM D 5142 modificada.
	Cenizas (CZ)	Analizador termogravimétrico (TGA), marca LECO.	Según norma ASTM D 5102 modificada.
	Sólidos Volátiles (SV)		
	Carbono fijo (CF)		
	Análisis elemental (C,O,H,N,S)	Analizador elemental, marca Perkin Elmer.	Manual del usuario de Perkin Elmer.
Contenido de fibra (%)	Lavarropas automático y estufa.	Técnica puesta a punto por el Laboratorio de Química de Productos Agroindustriales de la EEAOC.	
Caracterización energética.	Poder calorífico superior (PCS)	Bomba calorimétrica automatizada, marca IKA.	Según norma ASTM D 2015-96 modificada.
	Temperatura de fusión de cenizas (C°)	Equipo AF 700.	Según norma ASTM D1857-03.

Tabla 1: Detalle de las determinaciones físico-químicas y energéticas del sorgo fibroso.

Los equipos utilizados para las determinaciones pertenecen al Laboratorio de Evaluación y Mediciones Industriales (LEMI) y al Laboratorio de Química de Productos Agroindustriales, con excepción del equipo analizador elemental que corresponde al Núcleo de Excelencia en Sistemas Térmicos (NEST), perteneciente a la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI). Los procedimientos mencionados en la Tabla 1 se encuentran descriptos en el artículo de Cruz et al. (2016) y Diez et al. (2000).

Descripción de la situación actual del ingenio en el período de interzafra azucarera.

El ingenio que se propone para el estudio está situado en el departamento Leales, Tucumán. Durante el período de interzafra (150 días) funcionan la refinería de azúcar y la destilería de alcohol. La molienda de este ingenio ronda en 7500 toneladas de caña por día (TCD). El vapor se genera, por combustión exclusiva de gas natural, en calderas de baja presión, de rendimiento térmico promedio de 67%. Se generan aproximadamente 34,34 toneladas por hora de vapor vivo con una presión y temperatura de 20 bar y 330°C. Cabe aclarar que el uso de gas natural es debido a que el bagazo fue consumido durante la zafra. La refinería procesa 500 toneladas por día de azúcar crudo y para ello requiere aproximadamente de 550 toneladas de vapor escape por día. La destilería produce 65 metros cúbicos por día de alcohol, con un consumo de vapor escape de 4,2 kg/l, lo que equivale a aproximadamente 275 toneladas de vapor escape por día. El consumo promedio de gas natural que tiene la caldera es de aproximadamente 90.000 Nm³ por día. El turbogenerador de contrapresión existente tiene una eficiencia de 85%. El vapor escape resultante tiene una presión y temperatura de 2 bar y 125°C. El consumo de energía eléctrica del proceso completo es de aproximadamente 1570 kW. En la Figura 1 se observa el esquema del proceso fuera de zafra que involucra la refinería de azúcar y destilería de alcohol.

Para la resolución de los balances de masa y energía de la situación actual y del EERA, se utilizó un software de simulación energético desarrollado por el departamento de Energía de la Universidad de Delft, Holanda, el cual permite el análisis termodinámico y la optimización de sistemas para la

producción de electricidad, calor y refrigeración, llamado Cycle Tempo 5.0 (Universidad Tecnológica de Delft, Holanda, 2010).

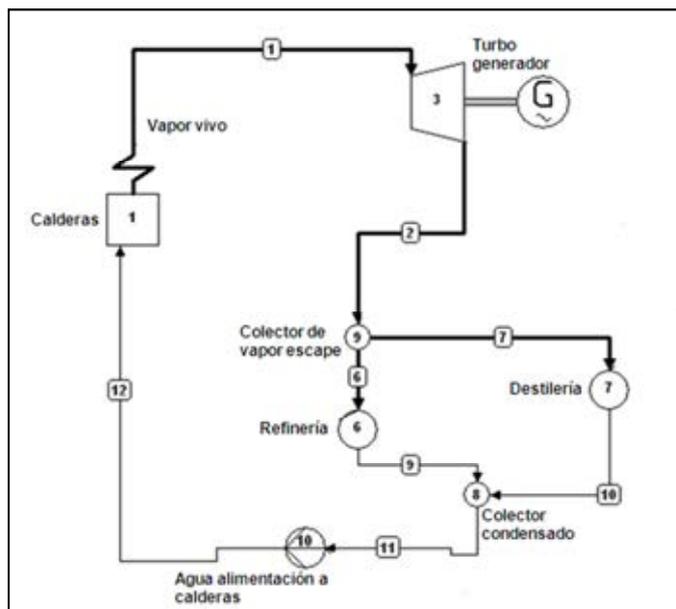


Figura 1: Esquema del proceso fuera de zafra.

De los balances de materia y energía que se resuelven con el simulador, se determina la energía del combustible necesaria para el sistema, a partir de la siguiente Ecuación 1:

$$\text{Energía comb.} = G_c * PCI_c \quad (1)$$

Poder calorífico inferior del combustible.

Para los cálculos del poder calorífico inferior (PCI), se sigue el método propuesto por Hugot (1986), mediante la Ecuación 2:

$$PCI = PCS * (1 - w) - 2442 * [9 * H * (1 - Cz) * (1 - w) + w] \quad (2)$$

Para realizar el cálculo del PCI de sorgo fibroso, se tomó los valores de PCS, contenidos de hidrogeno y ceniza, determinadas en la caracterización realizada. Se considera que el sorgo fibroso, en el momento de la combustión, tiene una humedad del 30%. Para lograr una humedad de la biomasa del 30%, en primer lugar se realizaría la cosecha del sorgo fibroso a una humedad del 50% según recomienda May et al. (2013). Luego, una vez transportado al ingenio se dejaría en un playón en las inmediaciones del mismo, para su secado natural a cielo abierto donde, según AVEBION, (2012), luego de dos meses cualquier biomasa se seca hasta el 30% en contenido de agua. Con esto se logra la humedad deseada para su combustión en la caldera.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinaciones físico químicas de sorgo fibroso.

En la Tabla 2 se muestran los resultados promedio de las determinaciones realizadas de humedad (W), de los parámetros termogravimétricos: cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF), como así también el promedio del contenido de fibra.

Los resultados se encuentran en el mismo orden de magnitud que los datos aportados por Fernández González et al. (2012) y Castagnaro et al. (2011). Cabe aclarar que el resultado de la humedad promedio de las muestras de 72,25 % es en base húmeda. En la Tabla 3 se observan los resultados del análisis elemental de carbono (C), Hidrogeno (H), Oxigeno (O), Azufre (S) y Nitrógeno (N), realizado en el NEST, Brasil.

Biomasa	Parámetro	Unidad	Valor promedio	Desviación estándar
Sorgo fibroso	W	% b.h.	72,25	3,97
	CZ	% b.s.	9,29	0,74
	SV	% b.s.	72,23	0,55
	CF	% b.s.	18,33	0,56
	Fibra	% b.h.	18,49	3,41

Tabla 2: Resultados promedio del análisis de humedad, análisis inmediato y contenido de fibra de muestras de sorgo fibroso.

Biomasa	C(%) b.s.	H (%) b.s.	O(%) b.s.	S(%)b.s.	N (%) b.s.
Sorgo fibroso	39,49	5,2	53,78	0,18	1,34

Tabla 3: Resultados del análisis de composición elemental de sorgo fibroso realizadas en el NEST, Brasil.

Los resultados obtenidos del análisis elemental concuerdan con diversos autores como Povse y Bogo (2008); Hugot (1986); Jenkins et al. (1998), etc.

Determinaciones energéticas del sorgo fibroso.

En la Tabla 4 se observa el resultado promedio del PCS.

Biomasa	Parámetro	Unidad	Valor promedio	Desviación estándar
Sorgo fibroso	PCS	kJ/kg	16.930,71	189,3

Tabla 4: Valor promedio del PCS

El poder calorífico superior del sorgo fibroso se encuentra en igual orden de magnitud que el PCS del bagazo de 17.847 [kJ/kg], informado por Castagnaro et al. (2011). En la Tabla 5 se pueden ver los resultados promedio del análisis de fusión de cenizas para el sorgo fibroso.

Sorgo fibroso	Temperatura de fusibilidad de cenizas							
	Atmosfera oxidante				Atmosfera reductora			
	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]
Promedio	837,00	917,67	1051,33	1201,67	857,33	954,00	1115,00	1247,00
CV	27,11	33,32	20,66	68,42	35,90	48,37	47,70	29,57

Tabla 5: Resultados promedio de la temperatura de fusión de cenizas para sorgo fibroso.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Fernandez et al. (2008). Debido a los resultados del análisis de fusibilidad de cenizas del sorgo fibroso obtenidos, donde se demuestra una baja temperatura de fusibilidad de 837°C para atmósfera oxidante y 857,33°C para atmósfera reductora, en comparación al bagazo (1110°C para atmósfera oxidante y 1081°C para atmósfera reductora (Peralta et al., 2014)), se decide que, el combustible renovable que ingresa a la caldera, para reemplazar el gas natural, esté compuesto por una mezcla de sorgo fibroso y bagazo de caña de azúcar.

Para determinar en qué proporción deben mezclarse ambos combustibles, se toma como referencia un artículo de Golato et al. (2017) realizado en el LEMI, donde la mezcla de sorgo fibroso de composición 30% y bagazo de composición 70%, arrojó una mínima temperatura inicial de deformación (DT) de 1200°C para atmósfera oxidante y 1125 °C para atmósfera reductora. Estos valores se encuentran dentro de las temperaturas que tiene el bagazo cuando se quema solo, como se puede observar en la Tabla 6, según los autores Peralta et al. (2014) y Magasiner et al. (2001).

	DT [°C] atmósfera oxidante	DT [°C] atmósfera reductora	Autor
Bagazo	1110	1081	Peralta et al. (2014)
Bagazo	1380	1310	Magasiner et al. (2001)
70% Bagazo + 30% sorgo	1200	1125	Golato et al. (2017)

Tabla 6: Valores de DT para atmósfera oxidante y reductora, para bagazo de caña de azúcar y la mezcla sorgo fibroso+bagazo.

Como lo que ingresa a la caldera es un combustible renovable compuesto por sorgo fibroso y bagazo de caña de azúcar en una proporción de 30% y 70% respectivamente, se calcula un PCI de combustible mezcla compuesto por sorgo fibroso y bagazo (PCI_{cm}), mediante la Ecuación 3.

$$PCI_{cm} = x_s * PCI_s + x_b * PCI_b \quad (3)$$

El PCI del sorgo fibroso (PCI_s), bagazo (PCI_b) y el de la mezcla de ambos combustibles resultaron en valores de 10.393,24 kJ/kg; 7.060,82 kJ/kg; y 8.060,54 kJ/kg respectivamente.

La simulación arroja que debe suministrarse a la caldera 36.529,32 kW para la generación del vapor requerida por el sistema actual. Esta cantidad de energía necesaria corresponde a un consumo de combustible renovable o combustible mezcla (G_{cm}) de 4,53 kg/s, calculado mediante la Ecuación 1. Los resultados obtenidos de los balances de masa y energía para el EERA representados por Cycle Tempo 5.0 se muestran en la Figura 2.

Dentro de los resultados que nos brinda el software, están las variables, presión (bar), temperatura (°C), entalpía (kJ/kg) y masa (kg/s), cuya información esta ordenada como se muestra en la Figura 3. Cabe aclarar que el software utiliza el punto para indicar la notación decimal.

20.00	330.00
3092.80	9.539

Figura 2: Resultados de la corriente de vapor vivo del software Cycle Tempo 5.0.

Presión = 20,00 bar; Temperatura = 330,00 °C; Entalpía = 3092,80 kJ/kg; Caudal Másico = 9,539 kg/s = 210 % cm.

Cálculo de sorgo fibroso necesario para el esquema energético renovable alternativo.

Habida cuenta que para llevar a cabo el EERA, se debe disponer de bagazo en la interzafra, entonces se deberá restituir este bagazo con una cantidad energéticamente equivalente de sorgo fibroso para los requerimientos de la fábrica durante el periodo de zafra durante 150 días. Mediante la Ecuación 4 se calcula la cantidad de sorgo fibroso (G_s) comprendida entre sorgo para esquema energético renovable alternativo (150 días de interzafra), y sorgo fibroso equivalente al bagazo para 150 días de zafra:

$$G_s = \underbrace{G_{sm} * 0,3}_{\text{Sorgo fibroso para el EERA para 150 días de interzafra.}} + \underbrace{G_{cm} * 0,7 * \frac{PCI_b}{PCI_s}}_{\text{Sorgo fibroso equivalente al bagazo para 150 días de zafra.}} \quad (4)$$

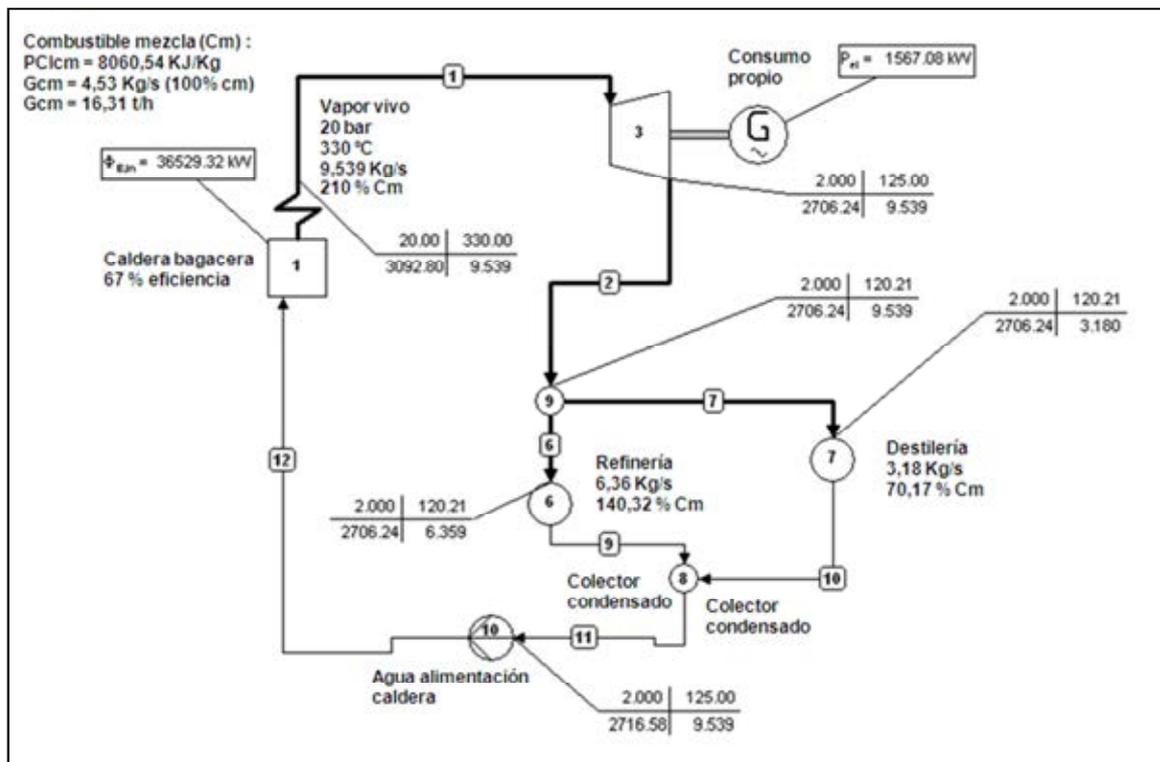


Figura 3: Esquema energético renovable alternativo resuelto.

La cantidad de sorgo fibroso comprendida entre sorgo fibroso para el combustible mezcla, y sorgo fibroso equivalente al bagazo resultó de 3,51 kg/s. Con el tiempo de operación del EERA de 150 días de interzafra, se determinan las toneladas de sorgo fibroso necesarias, resultando un valor de 45.490 toneladas. Tomando una productividad de biomasa de sorgo de 46,5 t/ha (Casen et al., 2015), al 30% de humedad, se calcula la superficie necesaria de sorgo fibroso, resultando en un valor de 979 ha. Las principales variables y resultados para el EERA, se muestran en la Tabla 7.

	Esquema energético renovable alternativo
Tiempo de operación en inter-zafra [días]	150
Composición del combustible mezcla.	30% sorgo fibroso+70% bagazo
Energía entregada por el combustible por unidad de tiempo [kJ/s]	36.529,32
Combustible mezcla (Gcm) [kg/s] - [t/d]	4,53 - 391,40
Sorgo fibroso para inter-zafra [kg/s]	1,36
Sorgo fibroso para zafra equivalente a bagazo [kg/s]	2,15
Sorgo fibroso total (Gs)[kg/s]	3,51
Sorgo fibroso total [t]	45.490
Superficie de sorgo fibroso [ha]	979
Presión y temperatura del vapor [bar] - [°C]	20-330
Vapor producido [t/h]	34,34
Eficiencia energética de la caldera [%]	67
Eficiencia del turbo [%]	85
Energía producida [kW]	1.567
Índice de generación de EE [kWh/t de Gcm]	96,05

Tabla 7: Principales variables y resultados del EERA.

CONCLUSIONES

Se pudieron realizar con éxito las determinaciones de las características fisicoquímicas y energéticas del sorgo fibroso. Los resultados se encuentran en el mismo orden de magnitud que los datos aportados por Castagnaro et al. (2011) y Fernández González et al. (2012) y en cuanto al análisis elemental, se puede apreciar que el sorgo fibroso y el bagazo de caña de azúcar presentan composiciones elementales que concuerdan con Hugot (1986); Jenkins et al. (1998), Povse y Bogo (2008); etc. Debido a los resultados obtenidos de fusibilidad de cenizas del sorgo fibroso, la combustión directa de este en calderas bagaceras convencionales no sería conveniente debido a la baja temperatura de fusibilidad de las cenizas, con respecto al bagazo. Esto provocaría la formación de escorias y sinterizados en la parrilla y los tubos de la caldera bagacera. Por ello se postula el empleo de un combustible mezcla formado por sorgo fibroso y bagazo de caña de azúcar.

La utilización del simulador Cycle Tempo 5.0 para la resolución de los balances de masa y energía ha demostrado ser una potente herramienta en estudios de pre-factibilidad de sistemas de cogeneración, gracias a la flexibilidad que este presenta para la producción, modificaciones y cálculo de los balances, como así también para la presentación de los valores obtenidos.

De los resultados del EERA, se confirma que se puede reemplazar el combustible usado actualmente en el ingenio (GN) por un combustible renovable alternativo compuesto por sorgo fibroso y bagazo de caña de azúcar en una proporción de 30% y 70% respectivamente. La superficie necesaria para llevar a cabo este proceso resultó de 979 ha de sorgo fibroso. Asimismo esta propuesta del uso de un combustible renovable alternativo confiere al sistema un impacto ambiental positivo y reduce el costo de producción de azúcar y alcohol para interzafra azucarera, logrando un ahorro de 90.000 Nm³/d de GN.

Los resultados de este análisis son la base para la realización a posterior de estudios acerca de utilizar una caldera de biomasa diseñada exclusivamente para sorgo fibroso, la determinación de la productividad energética del sorgo fibroso para su uso como combustible y la factibilidad económica de llevar a cabo esta propuesta.

NOMENCLATURA

ASTM: American Society for Testing and Materials

Energía comb. = Energía del combustible, en kW.

Gc = Caudal del combustible, en Kg/s.

PClc = Poder calorífico inferior del combustible, en kJ/kg.

xs = Fracción másica de sorgo fibroso, en porcentaje.

xb = Fracción másica de bagazo, en porcentaje.

PCIm = Poder calorífico inferior del combustible mezcla, en kJ/kg.

PCIs = Poder calorífico inferior del sorgo fibroso, en kJ/kg

PClb = Poder calorífico inferior del bagazo, en kJ/kg

Gcm = Caudal de combustible mezcla, en kg/s.

Gs = Caudal de sorgo fibroso total necesario para zafra e inter-zafra, en kg/s.

%b.s = por ciento en base seca.

%b.h = por ciento en base húmeda.

REFERENCIAS

ASTM D 5142-02. (2002). Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM D 2015-96 .(1996). Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

- ASTM D 1857-03. (2003). Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 1436-03. (2005). Standard Test Method for Testing of Brookfield Viscosity. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- AVEBIOM. (2012). Biomass Trade Centre2 - EU. Recuperado el 05 de Marzo de 2015, de Manual de Combustibles de Madera: www.biomassstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf.
- Casen, S.D., Fernandez Gonzalez, P., De Boeck, G., Tonatto, J., Medina, M. & Romero, E.R. (2015). Estudio del comportamiento de híbridos de alta fibra de sorgo para su utilización en la cogeneración de energía. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. scasen@eeaoc.org.ar.
- Castagnaro A., Golato M.A., Paz D. & Feijóo E.A. (2011). Caracterización energética de biomasa residual de origen agroindustrial de Tucumán. *Revista Avance Agroindustrial* 32 (2): 32-37.
- Cruz, M. C., Zamora Rueda, G. d. H., Golato, M. A. Paz D. (2016). “Experiencias entre laboratorio. Caracterización de biomasa regional. Argentina (Tucumán) y Brasil (Itajubá). *Avance Agroindustrial*. Vol. 37-4 dic.-34-39.
- Diez, O., Zossi, S., Chavanne, E. & Cárdenas, G. (2000). Calidad industrial de las variedades de caña de azúcar de maduración temprana LCP 85-384 y LCP 85-376 en Tucumán. *Análisis de sus principales constituyentes físico-químicos. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán*. Tomo 77 (2): p: 39-48.
- Fernandez González, P., Sanchez Ducca, A. (2012). Análisis del sorgo fibroso como cultivo alternativo para la obtención bioenergía. II Simposio Nacional de sorgo realizado por AIAMBA en Pergamino, Bs. As.
- Fernández, M. J., Borjabad, E., Barro, R., Losada J., Bados, R., Ramos, R., & J. E. Carrasco. CIEMAT. (2008). “Desarrollo, demostración y evaluación de la producción de energía en España a partir de la biomasa de cultivos energéticos” (PSE On Cultivos). Julio, 2008.
- Gil, S., Givogri, P. y Codesiera L. (2015). El Gas Natural en Argentina. Propuestas Período 2016-2025. Recuperado el 15 de enero de 2017 de: [file:///C:/Documents%20and%20Settings/mccruz/Mis%20documentos/Downloads/El%20Gas%20Natural%20en%20Argentina%20\(5\).pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/mccruz/Mis%20documentos/Downloads/El%20Gas%20Natural%20en%20Argentina%20(5).pdf)
- Golato, M., Mistretta G., Paz, D., Ruiz, M., y Cárdenas, G. (2017). Caracterización físico química y energética del sorgo fibroso para generación de energía eléctrica en Tucumán-Argentina. Comparación con el bagazo y residuos agrícolas de cosecha (RAC). Presentado para su publicación en *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 2017.
- Hugot, E. (1986). Manual para Ingenieros Azucareros. Compañía Editorial Continental, S. A. México D. F.
- Jenkins B. M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R. y Miles, L.L. (1998). Combustión properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54 Ed. Elsevier: 17-46.
- Magasiner, N., Van Alphen, C., Inkson, M.B. y Misplon. (2001). Characterising Fuels for Biomass-coal fired co-generation. *Proc S Afr Sug Technol Ass.* p: 282-291.
- May, A., da Silva, D.D. y dos Santos, F.C. Embrapa. (2013). Cultivo do sorgo biomassa para cogeração de energia elétrica. ISSN 1518-4277.
- Peralta, F.L., Zamora Rueda, G., Mistretta, G., Zalazar, H., Bravo, M.V., Feijóo, E., Golato, M., Paz, D. y Cárdenas, G. (2014). Determinación del punto de fusión de cenizas de bagazo y RAC de Tucumán. XXa Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar (SATCA).. Tucumán.
- Povse, V. y Bogo, H. (2008). Análisis de C, H, N, S, y O sobre muestras sólidas. Informe Inédito (MA-100409-022/034). Inquimae, FCE y N, UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Universidad Tecnológica de Delft, Holanda. (2010). Cycle Tempo 5.0. Autor y responsable de la página Teus van der Stelt (T.P: vanderStelt@tudelft.nl).

ABSTRACT

With the purpose to eliminate the consumption of natural gas from a sugar mill located in the off season period; a study was carried out to replace this fossil fuel with a new fuel of renewable origin: fibrous sorghum. For this reason, the physical-chemical and energetic characterization of

same was performed. Also was exposed the current situation of a sugar mill that consumes 90,000 Nm³ of natural gas per day during off season period. The analysis describes the current state of the sugar mill and postulates: an energy scheme alternative renewable, which involves the use a blend fuel consisting of 30% fibrous sorghum + 70% sugar cane bagasse. The energy scheme alternative renewable requires 391.4 t / day (4.53 kg / s) of blend fuel to replace the natural gas consumed during the off season period, which amounts to a total of 45,490 t of fibrous sorghum (979 ha), considering the sorghum extra to supply the bagasse in season.

Key words: fibrous sorghum, fuel, off season.

ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOÉSICOS: CÁLCULO y DISEÑO PARA CASO DE ESTUDIO.

Magalí E. Carro Pérez¹, Agustina Peiretti², Franco M. Francisca³.

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) - Grupo de Investigación en Medios Porosos y Flujos Subterráneos (IMPAS) - Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) Universidad Nacional de Córdoba (UNC) - Vélez Sarsfield 1611 CP 5017, Córdoba, Argentina
– Tel. + 54 0351 – 5353800 (int. 18) - e-mail: mcarroperez@unc.edu.ar

Recibido 13/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es poner de manifiesto la utilización de la energía geotérmica de baja entalpía como una opción económica y ecológicamente amigable para la colaboración en la climatización de ambientes. Se realizan los cálculos y diseño en base a las características térmicas de los parámetros intervinientes, tanto del suelo y clima local como de los materiales de la envolvente de la construcción. Se determina, mediante balances térmicos realizados sobre un software libre BT6 creado por Dilasoft, el análisis energético y económico que produce la aplicación del sistema de geotermia de baja entalpía. Los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que la implementación de este tipo de sistema presenta una solución económica y energéticamente eficiente.

Palabras clave: cálculo, geotermia somera, loess, diseño, instalación.

INTRODUCCION

El crecimiento de la población en las últimas décadas deriva, entre otras cosas, en un mayor consumo de energía. Esto trae como consecuencia el agotamiento de recursos naturales y un fuerte impacto sobre el medio ambiente. Para poder disminuir este efecto, es importante conocer y realizar un uso eficiente de la energía, la búsqueda de nuevas alternativas para su obtención y plantear el desarrollo de nuevas tecnologías y fuentes energéticas que sean de origen renovables. Resultan importantes dos aspectos, el primero relacionado en satisfacer las necesidades de generación de energía de fuentes renovables y el segundo es lograr disminuir el uso de energía de forma irracional, esto último puede conseguirse con la aplicación de políticas que logren una concientización en los usuarios y cambios en sus hábitos de consumo de la energía disponible. Si se analiza la situación de Argentina, la cual se destaca por su diversidad de recursos energéticos, sus principales fuentes de energía provienen de la utilización de combustibles fósiles. En la última década, Argentina aumentó la emisión de gases de efecto invernadero debido a la utilización de fuentes de energía eléctrica que provienen de recursos no renovables, así como también debido al uso irracional que se produce de la misma. La ley 26.190, Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica, prevé que para el año 2025 el país deberá contar con un 20% de fuentes de energías de origen renovables (Cárdenas, 2013).

¹ Profesora Titular de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (FCEFyN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC) e Investigadora Asistente CONICET - Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT, UNC-CONICET)

² Profesional Independiente – Graduada de la FCEFyN UNC – Ex Becaria IMPAS

³ Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (FCEFyN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC) e Investigador Independiente CONICET - Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT, UNC-CONICET).

Si consideramos la matriz energética de nuestro país basada en datos del año 2015 (Figura 1). Se observa que más del 80% de las fuentes de energía son no renovables, dependientes de hidrocarburos en su mayoría, del 20% restante existe solo un 11% que abarca todas las energías de fuentes renovables. Dentro de las energías renovables se pueden nombrar: eólica, hidroeléctrica y solar, son las más reconocidas y sobre las cuales se han realizados estudios y proyectos de gran envergadura. También existe una gran variedad de energías menos conocidas que están ganando importancia en el medio, se puede nombrar entre ellas: biomasa, energía mareomotriz, entre otras, y por último, la de nuestro estudio, la energía geotérmica.

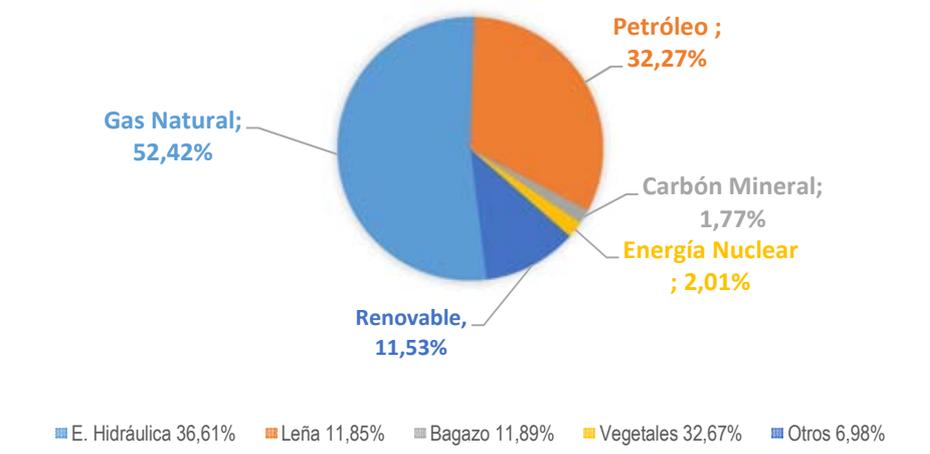


Figura 1: Matriz energética Argentina (datos del año 2015)

La energía geotérmica tiene su fuente en el calor almacenado en el subsuelo de la tierra por lo que se considera como una energía renovable. La diferencia de temperaturas entre el interior de la tierra y la superficie, forman un gradiente térmico, el cual genera una flujo de energía en forma de calor desde el interior hasta la superficie. Este tipo de energía se puede clasificar en función de las temperaturas: temperatura alta $T^a > 150^{\circ}\text{C}$, son yacimientos de aguas confinadas a altas temperaturas en terrenos con actividad magmática reciente o residual que actúa de foco de calor, se localizan entre los 1500 y 3000 metros de profundidad; temperatura media $150^{\circ}\text{C} > T^a > 90^{\circ}\text{C}$, son yacimientos con unas temperaturas entre los 90 y 150°C que se sitúan en cuencas sedimentarias, se localizan entre los 1000 y 3000 metros, las fracturas del terreno pueden hacer que ascienda agua caliente hasta la superficie dando lugar a los clásicos manantiales termales; baja temperatura $90^{\circ}\text{C} > T^a > 25^{\circ}\text{C}$ y muy baja temperatura (o baja entalpía) $25^{\circ}\text{C} > T^a$. Las dos clasificaciones anteriores son yacimientos que se sitúan a niveles cerca de la superficie, estos aprovechan la diferencia de temperatura entre el suelo y la superficie. Con lo mencionado anteriormente se puede concluir que la geotermia incluye desde aprovechamientos geotermiales con agua hasta otros de baja entalpía que utilizan la diferencia de temperatura entre la superficie y el subsuelo. La energía geotérmica de baja entalpía puede ser aprovechada en cualquier lugar sobre la superficie del planeta. Este tipo de energía se basa en que el subsuelo tiene la capacidad de almacenar calor y mantener su temperatura casi constante a lo largo del año. Para poder aprovechar la energía geotérmica de baja entalpía generalmente se utilizan intercambiadores de calor, los cuales pueden ser tierra-agua o tierra-aire. Ambos funcionan de igual manera, sólo que cambia el fluido (Carrasco y Márquez, 2015; Iannelli y Gil, 2012;).

EDIFICIO EN ESTUDIO

El inmueble evaluado es el edificio de la Asociación de Docentes e Investigadores Universitarios de Córdoba (ADIUC), ubicado en Ciudad Universitaria en la esquina de Haya de la Torre y Nores Martínez en un predio de 4.500 metros cuadrados cedido por la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). El predio se encuentra ubicado en la Zona Bioambiental III Templada Cálida, sub zona III a Templada Cálida Seca con amplitudes térmicas mayores que 14°C según la norma IRAM 11603. Las coordenadas de su posición geográfica son $31^{\circ} 26' 24''$ Latitud Sur y $64^{\circ} 11' 00''$ Latitud Oeste con una elevación de 438 m sobre el nivel del mar. El edificio, posee un salón de usos múltiples con una

superficie de 165 m², una altura interior de 3.65 m y un volumen de 602 m³. El salón en estudio forma parte de esta construcción que cuenta además con otro taller, de menores dimensiones, una recepción, espacios de circulación, office, asador, depósito y áreas de transición. El edificio se caracteriza por ser utilizado por una amplia variedad de público en horarios diurnos para reuniones y asambleas. El edificio en estudio tiene una superficie cubierta de 165 m² y una altura exterior de 4.35 m y 3.65 m interior. La envolvente perimetral está definida por carpintería metálica, no portante, y en su interior las divisiones están realizadas con materiales livianos del tipo durlock. La envolvente se encuentra materializada por una chapa exterior acanalada con cámara de aire de 0.34 cm de espesor, seguido por una aislación de lana de vidrio continua (no dividida en los montantes) revestida en su interior con una placa de durlock, estableciendo en su conjunto un cerramiento vertical con 0.45 cm de espesor. Este edificio fue objeto de estudio de los autores con otros propósitos y sus resultados se publicaron en Costantini et al., 2016.

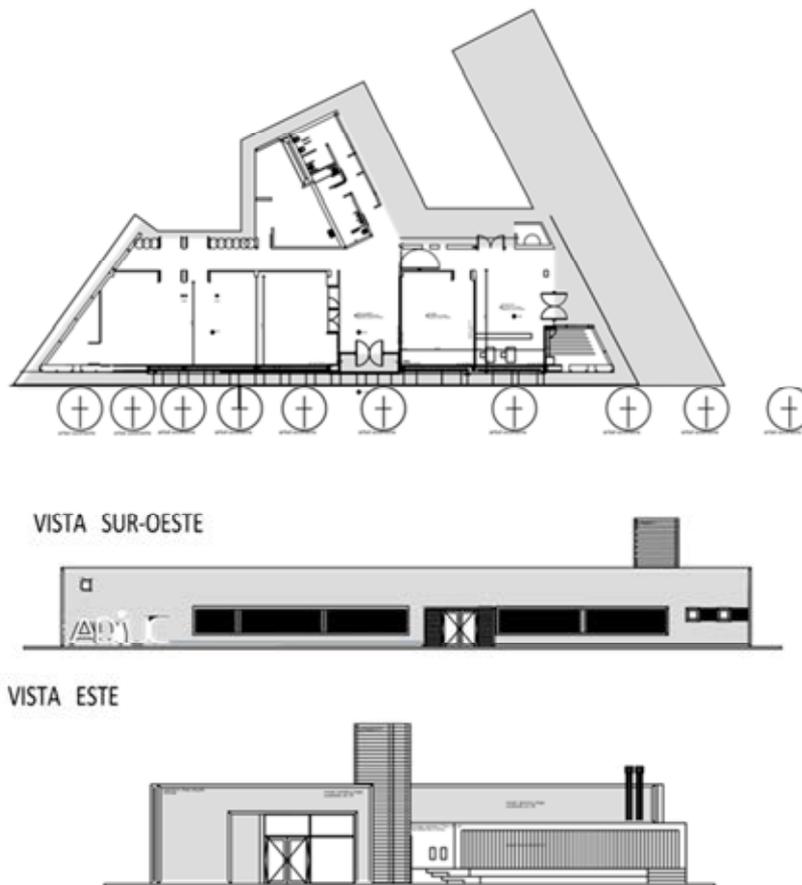


Figura 2: Planta y fachadas de edificio en estudio.

Balance térmico

Para entender el comportamiento térmico de un recinto se deben determinar las ganancias y pérdidas de calor que son generadas bajo ciertas condiciones. El balance térmico es un método que permite determinar las cargas térmicas de un local. Con estas se puede conocer la demanda de sistemas artificiales, es decir, la cantidad de calor que hay que suministrar o quitar del ambiente, para poder compensar las pérdidas o ganancias. El término ganancias hace referencia a todos los elementos o actividades que aporten calor al ambiente por ejemplo: los motores, el calor emitido por los ocupantes, entre otros; además de ganancias por conducción a través de superficies acristaladas. En cambio, cuando se refiere a pérdidas, se hace referencia a las fugas de aire caliente, voluntarias o involuntarias, a través de muros y techos, pérdidas por flujo de aire indeseado por rendijas de aberturas y por renovaciones de aire. Por todo lo expuesto anteriormente se debe realizar un balance térmico en verano y otro en invierno. La determinación de cargas térmicas se puede definir a través de diferentes condiciones:

Condiciones exteriores: En este punto se deben reunir las temperaturas (verano-invierno), valores máximos y mínimos correspondientes a valores estadísticos de cada zona en particular. Esta tarea se encuentra resumida en la norma IRAM 11603 (IRAM; 1996) que establece las condiciones climáticas diferenciadas en zonas del todo el país. La ciudad de Córdoba, donde se encuentra situado el edificio en estudio, tiene un clima caracterizado por ser templado subtropical húmedo con invierno seco también conocido como pampeano, la misma tiene muchas diferencia entre sus estaciones, los veranos son húmedos, con días calurosos y noches templadas. Los vientos del este y del oeste son raros, de corta duración y poca intensidad. En primavera soplan con fuerza creciente principalmente del norte y el noreste. En el verano frecuentemente se producen tormentas eléctricas con viento y granizo. Según la norma IRAM 11603, en enero, mes más cálido del verano, la máxima media es de 30,7°C y la mínima media de 17,1°C con una humedad del 61%, en julio, mes más frío, la temperatura máxima media es de 19,5°C y 5,8°C de mínima con una humedad del 60%. Aún en invierno pueden ser frecuentes días algo cálidos.

Condiciones interiores: Las condiciones de temperatura y humedad en el interior de un local dependen de varios factores: la actividad, a mayor actividad, mayor desprendimiento de calor; temperatura radiante media de los cerramientos; velocidad del aire que debe tener un valor entre 1 m/s y 0,1 m/s para evitar molestias en los habitantes y permitir una renovación constante del aire.

Ganancias y pérdidas de calor sensible por cerramientos opacos (muros): El calor sensible es el que intercambia un cuerpo a la vez que su temperatura cambia. Las transferencias de calor en un muro ocurren por conducción. El régimen estable se suele utilizar en balances para invierno, mientras que en verano se suele considerar el régimen variable debido a la importante influencia de la radiación durante el día en los cerramientos.

Ganancias y pérdidas de calor sensible por cerramientos translúcidos (vidrios): En este caso ocurren transferencias de calor por medio de dos fenómenos: 1-Conducción, del mismo modo que ocurre en los muros- 2- Radiación. En el caso de la conducción, tendremos tanto ganancias como pérdidas, y su determinación se realiza de la misma forma que con los cerramientos opacos. La radiación sólo produce ganancias.

Cargas de calor latente: El calor latente es aquel que intercambia un sistema para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura. Realizar este análisis es importante en verano ya que el contenido de humedad tiende a ser mayor del recomendable. Por ello, es preciso secar el aire, o sea, disminuir el contenido de humedad, esto se obtiene enfriando el aire por debajo del punto de rocío (punto donde se produce la condensación del vapor de agua). Este calor se conoce como calor latente.

Ganancias de calor sensible y latente por cargas internas: Tanto el calor sensible como latente se obtienen de las personas (el metabolismo del cuerpo elimina calor, en función de la actividad que se esté realizando, así como también por medio de la transpiración) o de artefactos del local (dependen de su fuente de alimentación, el calor latente lo podemos determinar si conocemos la cantidad de energía consumida). La iluminación solo genera un aumento de temperatura.

Ganancias y pérdidas de calor sensible y latente debido al ingreso de aire exterior: El aire exterior que ingresa al local ya sea de manera voluntaria o involuntaria, debe considerarse como una carga para el equipo de climatización, porque el aire que ingresa tiene la misma temperatura y humedad del exterior, ya que debe llevarlo de las condiciones exteriores a las necesarias en el interior.

El aire ingresante se puede dividir en dos tipos:

- 1- Aire exterior de infiltración.
- 2- Aire exterior de renovación higiénica.

Una vez obtenidos los caudales de aire se deben estimar los ingresos de calor sensible y latente que se producen en función de coeficientes de calor volumétricos y diferencias de temperaturas.

El clima en el que se encuentra el edificio es clave para proyectar el diseño del mismo. La norma IRAM 11603 (IRAM; 1996): “Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina” establece una zonificación de nuestro país en zona bioambientales, esta clasificación se realiza teniendo en cuenta los índices de confort de la Temperatura Efectiva Corregida (TEC) y otros indicadores para las zonas cálidas, para el caso de las zonas frías se clasifican en función de los Grados-Días para las necesidades de calefacción.

Para cada una de ellas, se dan pautas generales para el diseño, la evaluación de las orientaciones favorables y el cumplimiento del asoleamiento mínimo de los edificios destinados a vivienda.

La ciudad de Córdoba se encuentra en la zona bioambiental III: Templada Cálida, Subzona IIIa con amplitudes térmicas mayores a los 14°C según norma IRAM 11603 (IRAM, 1996). Además, la norma

nos provee las temperaturas de diseño, las cuales para la ciudad de Córdoba corresponde para el mes de enero, TDMM_{Max} (temperatura de diseño media máxima) de 30,7°C y la TDMM_{Min} (temperatura de diseño media mínima) 17,1°C y para el mes de julio. TDMM_{Max} es de 19,5°C y 5,8 °C como TDMM_{Min}. Además, determina las condiciones de confort para meses de verano y de invierno.

Con los parámetros y materiales constructivos conocidos, se realiza el cálculo de los balances térmicos considerando todas las condiciones anteriormente mencionadas. El balance térmico se realizó mediante el programa computacional denominado BT6 de Dilasoft. El programa utiliza el método de cálculo según las funciones de transferencia de calor y es posible realizar los cálculos térmicos para calefacción y refrigeración de los recintos

Los resultados obtenidos son:

EN VERANO: 37592 frigorías/hora

EN INVIERNO: 27824 kcal/hora

Conocido los valores del balance térmico, se busca como objetivo utilizar el método de tubos enterrados para lograr una disminución en el consumo de energía, ya que se logra una disminución de la temperatura al aplicar el método.

CÁLCULO Y APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA

El método considerado para este estudio fue el de tubos provenzales o canadienses el cual consiste en enterrar un tubo a una profundidad suficiente (entre 2 metros y 5 metros) donde la temperatura del suelo no se ve afectada por el clima exterior y hacer pasar aire por los tubos. Este fluido de intercambio, al entrar en contacto con las paredes del tubo que se encuentran a la misma temperatura del subsuelo, siendo esta temperatura menor o mayor que la exterior, logran el enfriamiento o calentamiento del mismo y luego se hace circular el aire tratado hacia el interior del edificio. El subsuelo actúa como intercambiador de calor.

Existen varias configuraciones que pueden ser utilizadas al momento de implementar el sistema de intercambiador de calor aire-suelo, dentro de los que destacamos:

- *Anillo*: consiste en rodear el edificio con la tubería enterrada, es apta para construcciones pequeñas y con poca demanda.
- *Rejilla*: se realiza una red de tuberías enterradas, se realiza para construcciones grandes y cuando se dispone de espacio suficiente.
- *Verticales*: consiste en aplicar una tubería enterrada de forma vertical, se utiliza generalmente para grandes construcciones pero cuando no existe espacio suficiente para utilizar alguna de las opciones mencionadas anteriormente.

Todas las configuraciones mencionadas tienen los siguientes componentes:

- Punto de captación de aire: es el punto donde ingresa aire al sistema, debe ubicarse a una altura adecuada, para evitar que se tome aire contaminado.
- Intercambiador de calor: es el elemento en el que se produce la transferencia de calor debido a la diferencia de temperaturas entre el aire y el tubo.
- Elemento de circulación del aire: es el encargado de hacer circular el aire dentro del tubo. Este componente es opcional, pero en caso de ser utilizado, el mismo puede ser mecánico (como un extractor de baño) o pasivo (como ser una chimenea solar).
- Punto de drenaje: los tubos deben tener una pendiente mínima entre 2% y 5% , para poder recolectar el agua que se genera por condensación dentro del tubo, debido a las variaciones de humedad del suelo. Este elemento se encuentra al final del tubo y puede consistir en un recinto con un lecho de gravas donde el agua filtre al suelo o en el caso de estructuras de mayor escala, se realiza un acceso al mismo y se extrae el agua con la ayuda de bombas mecánicas.
- Filtros: se colocan inmediatamente luego del punto de captación de aire y su función es garantizar que el aire que ingresa sea puro.

Si se habla del rendimiento de este tipo de sistemas, es importante destacar que son mucho más eficientes en condiciones de verano que para el caso de invierno, esto se debe a que en condiciones invernales el aire no aporta todo el calor necesario para la climatización, pero sí ofrece un precalentado

del aire, lo cual se traduce en un ahorro energético ya que el salto térmico que debe aportar el sistema externo es menor (Cabezas, 2013).

Dimensionado

En la literatura se encuentran varios modelos de cálculos para intercambiadores de calor tierra-aire. Tzaferis y otros (1992) estudiaron varios modelos. Los autores clasificaron los algoritmos en dos grupos: el primero calcula la transferencia de calor desde el aire de circulación a la tubería y luego calcula la transferencia de calor de la tubería al suelo. Los datos de entrada necesarios son: las características geométricas del sistema, las características térmicas de la tubería y del suelo, la temperatura del suelo durante el funcionamiento del sistema (Paepe y Janssens, 2002).

La resolución de la mayoría de los métodos citados es compleja y su resolución se hace por medio de herramientas matemáticas. En la mayoría de los casos, los intercambiadores de calor tierra-aire son sólo un componente en un sistema de edificios enteros. Los diseñadores no tienen mucha libertad de elección para determinar el tamaño y la disposición del intercambiador de calor. Están limitadas por las restricciones de espacio y las condiciones económicas de los límites. Necesitan una manera simplificada de predecir el rendimiento general del intercambiador de calor. Su principal objetivo es poder seleccionar un tamaño razonable del diámetro, longitud de la tubería y número de tubos. En este trabajo se optó por el Método de la efectividad NTU, se basa en la determinación de dos números adimensionales ϵ (eficiencia) y NTU (número de unidades de transferencia), los cuales se relacionan por medio de las ecuaciones 1 y 2; en este caso aplicado a un intercambiador de calor aire-suelo desarrollado por Paepe y Janssens. Este método permite obtener las temperaturas del aire a la salida del sistema, conociendo la temperatura de entrada del aire y su velocidad, además de establecer antes del cálculo, las dimensiones y longitud de los caños. La temperatura de salida se determina a través del cálculo de la ecuación (3):

$$\epsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (1)$$

$$NTU = \frac{UA}{m_{air}c_{p,air}} \quad (2)$$

$$T_{air,out} = T_{wall} + (T_{air,in} - T_{wall})e^{-\left(\frac{hA}{m_{air}c_{p,air}}\right)} \quad (3)$$

Dónde: m_{air} : el caudal másico de aire

$c_{p,air}$: Capacidad térmica del aire

UA : Conductividad térmica total

h : el coeficiente de convección del aire dentro del tubo

A : Sección transversal del tubo

T = temperatura de salida del aire, de la pared y de entrada del aire.

Para poder aplicar el método de diseño del sistema de intercambiador de calor tierra-aire, es preciso conocer determinadas propiedades tanto del suelo como del material de los tubos los cuales se expresan en la Tabla 1.

PARÁMETROS	Unidades	AIRE	SUELO LOCAL	TUBO
Conductividad térmica (λ)	W/Km	0,025	0,80	0,16
Densidad (ρ)	Kg/m ³	1,1458		
Capacidad térmica	J/KgK	1007		
Viscosidad dinámica (μ)	Kg/m.s	0,00001875		
Viscosidad cinemática (ν)	m ² /s	1,6364E-05		
Difusividad térmica (α)	m ² /s	0,00002167		

Tabla 1: Parámetros intervinientes, para el caso de estudio.

Se aplicó el método de cálculo de NTU, asumiendo una configuración de tubos enterrados que se extienden en el terreno disponible del edificio, la cual será construida con tubos de PVC de diámetro

exterior de 0,22 m, longitudes variables, un extractor de aire con una velocidad de 5m/s. Se asume una temperatura del suelo de 17°C en verano y 18°C en invierno. Se han realizados varias investigaciones y se puede concluir que a partir de los 2 metros de profundidad la temperatura permanece constante, próximo a los valores mencionados, dependiendo del lugar del planeta que se considere. La temperatura de ingreso de aire es variable y depende de la estación que se esté considerando. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Siendo:

Φ_e : Diámetro exterior del tubo.

L: Longitud del tubo.

A: Área transversal del tubo.

V: Velocidad del aire.

Q: caudal del aire.

UA: valor donde intervienen las resistencias térmicas de los materiales, que a su vez dependen de las conductividades térmicas de los mismos.

ϕ_e (m)	L (m)	Área (m ²)	V (m/s)	\dot{m}_{air} (kg/seg)	UA (W/K)	ϵ (adim)	T _{air,in} (°C)	T _{suelo} (°C)	T _{air,out} (°C)
0,22	5	0,04	5	0,22	7,17	0,03	30,7	17	30,3
0,22	10	0,04	5	0,22	14,35	0,06	30,7	17	29,8
0,22	20	0,04	5	0,22	28,70	0,12	30,7	17	29,0
0,22	30	0,04	5	0,22	43,05	0,18	30,7	17	28,3
0,22	40	0,04	5	0,22	57,40	0,23	30,7	17	27,6
0,22	50	0,04	5	0,22	71,75	0,28	30,7	17	26,9
0,22	60	0,04	5	0,22	86,10	0,32	30,7	17	26,3
0,22	70	0,04	5	0,22	100,45	0,37	30,7	17	25,7
0,22	80	0,04	5	0,22	114,80	0,41	30,7	17	25,1
0,22	90	0,04	5	0,22	129,15	0,44	30,7	17	24,6
0,22	100	0,04	5	0,22	143,50	0,48	30,7	17	24,1
0,22	110	0,04	5	0,22	157,85	0,51	30,7	17	23,7
0,22	120	0,04	5	0,22	172,20	0,54	30,7	17	23,3
0,22	130	0,04	5	0,22	186,55	0,57	30,7	17	22,9
0,22	140	0,04	5	0,22	200,90	0,60	30,7	17	22,5
0,22	150	0,04	5	0,22	215,25	0,62	30,7	17	22,1

Tabla 2: Resultados obtenidos de la aplicación del método, en condiciones verano.

Si se considera la variación de la longitud del tubo y se mantiene constante la temperatura del aire a la entrada del tubo, asumiendo una temperatura igual a la media máxima de verano y de invierno, para las condiciones del suelo loésico (conductividad del suelo local de 0.80 W/mK por Narsilio et al.,2015), se podrá observar como varía la longitud de la instalación en función de la temperatura del aire a la salida del tubo (Figura 2 y Figura 3).

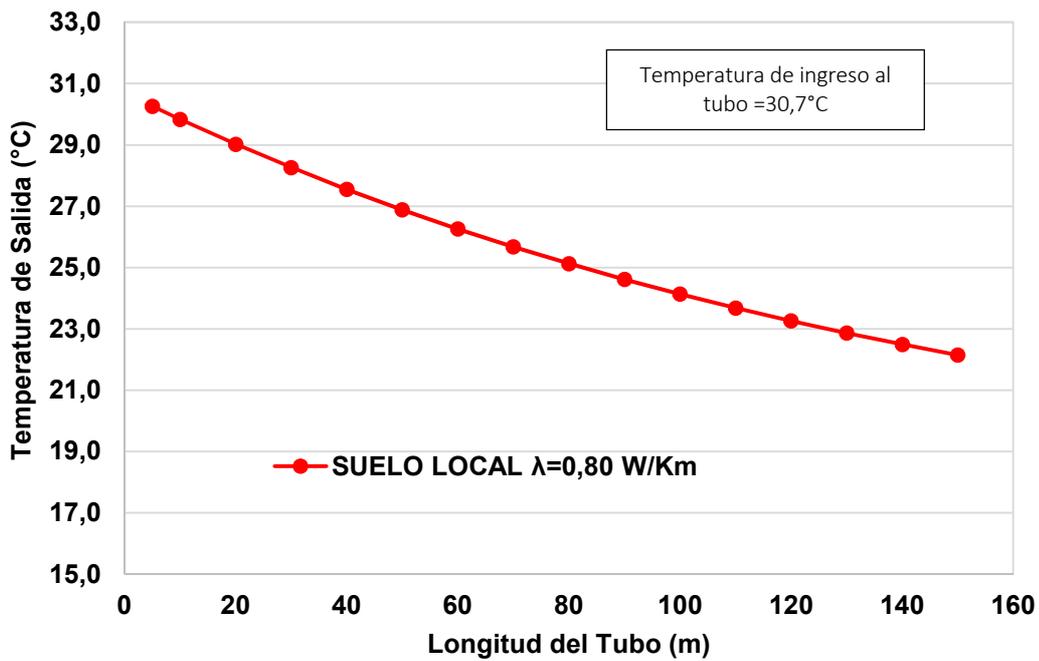


Figura 3: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de verano (temperatura de ingreso constante)

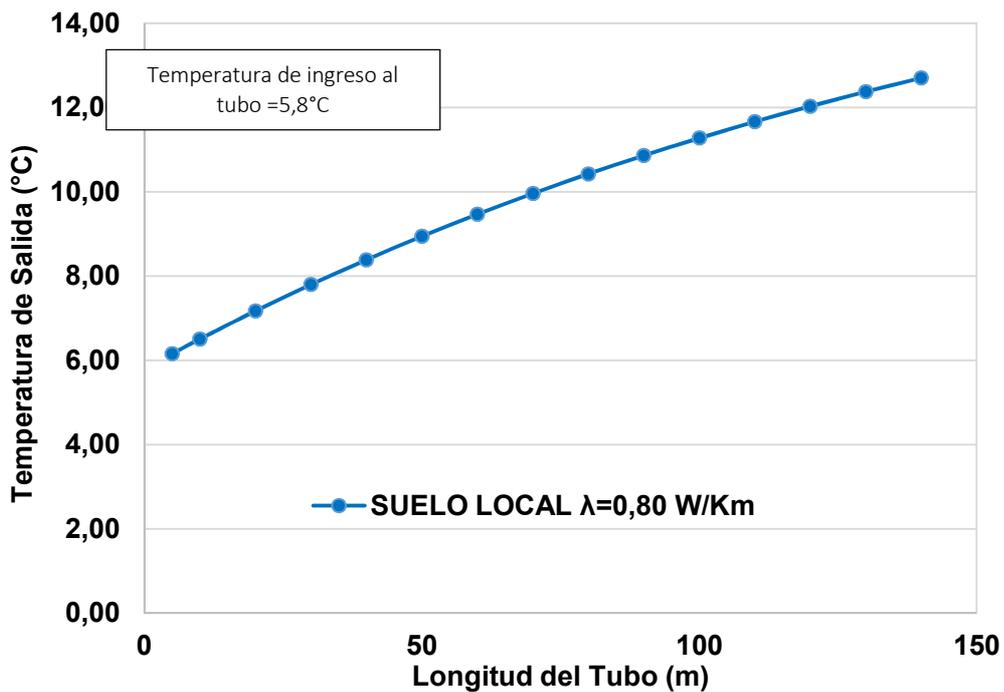


Figura 4: Temperatura vs. Longitud del Tubo en condiciones de invierno (temperatura de ingreso constante)

En las figuras 3 y 4, se puede observar, que para lograr una mayor disminución de temperatura en verano o mayor aumento en invierno, se necesita una longitud mayor considerando siempre la misma velocidad, esto se debe a que al estar el aire más tiempo en contacto con el tubo, que se encuentra a la misma temperatura del suelo, se genera un intercambio de calor mejor. A mayor longitud del conducto existe mayor transferencia de calor y el rendimiento del sistema aumenta. Dicha longitud no se puede prolongar indefinidamente, para mejorar el rendimiento, debido a que la temperatura de salida presenta un comportamiento asintótico con respecto a la longitud del conducto. Ello permite definir una longitud máxima a partir de la cual cualquier aumento influye despreciablemente en la temperatura de salida del aire, por lo que se hace poco conveniente económicamente.

Para este caso de estudio, se adoptó una longitud de tubos de 90 metros, este valor se determinó considerando tanto las condiciones de invierno como de verano, para poder aprovechar al máximo el sistema aplicado, teniendo en cuenta el limitante, en este caso, el terreno disponible para la colocación de los tubos. Por otro lado, si se tomará en consideración la velocidad del aire dentro del tubo y se desea observar cómo varía la longitud del tubo en función de la misma, el gráfico final es el que se presentan en la Figura 5. Si se analiza esta figura, mientras menor sea la velocidad, menor será la longitud necesaria del tubo para poder obtener una temperatura de, por ejemplo, 25°C a la salida del mismo, esto se debe a que el aire se encuentra más tiempo en contacto con las paredes del tubo y permiten un mayor intercambio de calor.

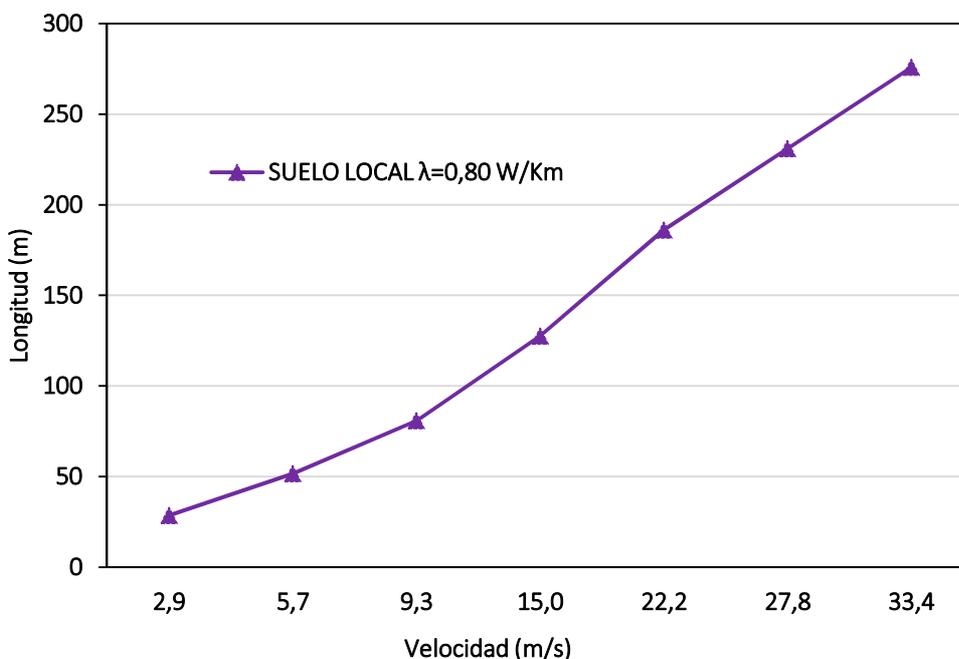


Figura 5: Longitud del tubo vs. Velocidad dentro del tubo, en condiciones de verano.

DISEÑO Y ANÁLISIS

Una vez calculada la instalación de geotermia de baja entalpía en suelos loésicos, se realizaron los planos de proyecto y detalles de la implementación del sistema en el edificio en estudio. En la Figura 6 se observa la planta del edificio y la ubicación de los 3 tubos y en la Figura 7 los detalles de colocación de los conductos, casillas de ingreso de aire exterior e instalación de ingreso del aire pre acondicionado al salón estudiado.

Considerando la aplicación del método, adoptando 3 tubos de 30 metros cada uno, con una velocidad de 5m/s, se vuelve a calcular el balance energético considerando la disminución de temperatura asociada y luego se compara con los valores iniciales, indicado en la Tabla 3.

Sin sistema de geotermia de baja entalpía		Con sistema de geotermia de baja entalpía	
Verano	Invierno	Verano	Invierno
37592 frig/hora	27824 Kcal/hora	27463 frig/hora	18298Kcal /hora

Tabla 3: Comparación de resultados de balance térmico.

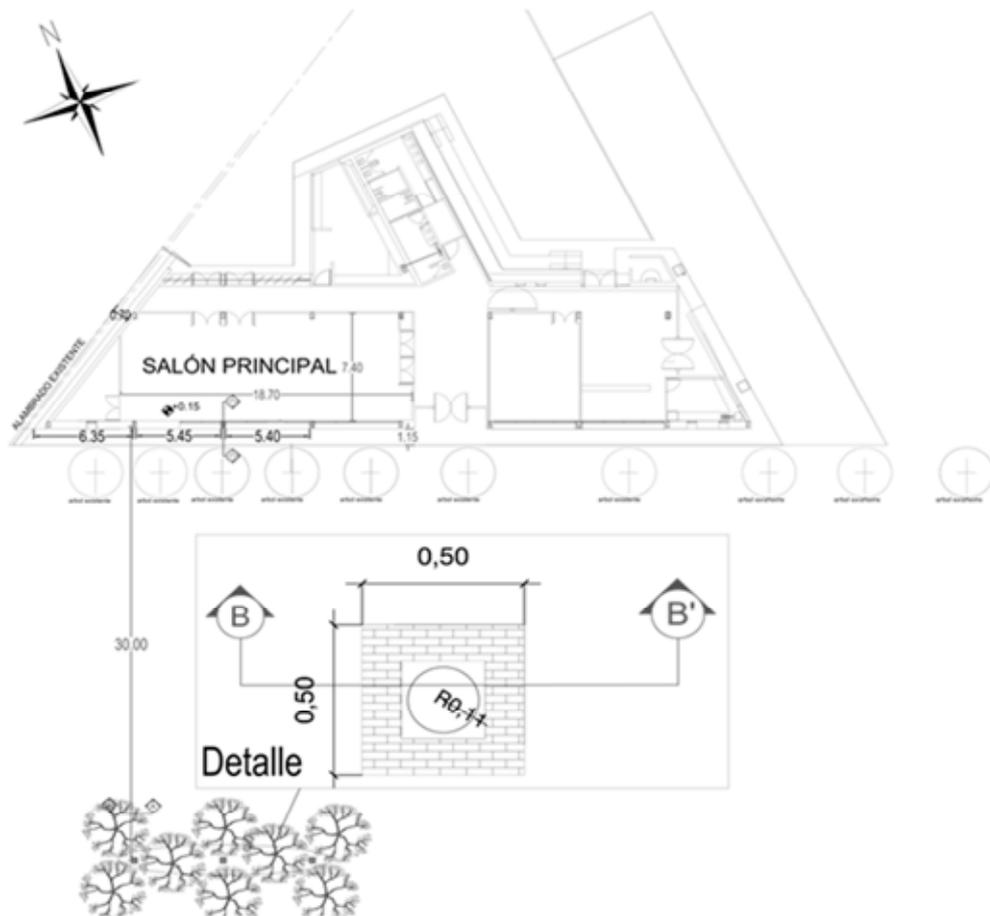


Figura 6: Ubicación en planta de los conductos.

Se puede observar que sin la aplicación del método se requerían 38kcal/hm^3 en invierno y 60 frigorías/ hm^3 en verano. Por otro lado, con la incorporación de tubos se requerirían 31 Kcal/ hm^3 para calefacción en invierno y 46 frigorías/ hm^3 para refrigeración en verano. Los resultados obtenidos permiten demostrar que se lograría un ahorro energético significativo, sobretodo en la época estival donde la reducción es de un 25% aproximadamente y un 20% en época invernal. Y esto, traducido a costos económicos se puede decir que se produce una disminución del costo en un **50%**, lo cual es muy apreciable.

CONCLUSIONES

Es importante buscar nuevas tecnologías que pueden ser aplicadas con el fin de satisfacer necesidades de la sociedad y a su vez, hacer uso de un recurso natural y renovable como lo es la energía geotérmica. El uso de energía geotérmica de baja entalpía por medio de un sistema de tubos enterrados puede utilizarse en cualquier lugar del mundo, solo hay que conocer algunas características del lugar de emplazamiento y las características del suelo.

A diferencia de las otras fuentes de energía, la geotermia ofrece un flujo constante y uniforme independientemente de variaciones estacionales ya sean lluvias, sol, viento, etc.

Los intercambiadores de calor tierra-aire, se basan en la utilización de la energía térmica del subsuelo para pre-tratar el aire de ventilación de los edificios contribuyendo a reducir la temperatura del aquel que ingresa en los edificios durante el verano y aumentándola durante el invierno.

Cabe destacar que los pozos provenzales/canadienses resultan muy eficientes en la refrigeración en verano, haciendo que puedan sustituir o complementar perfectamente a los convencionales sistemas de aire acondicionado. La comparación del gasto de energía que tienen los pozos provenzales (un extractor de poco consumo cuando el sistema de extracción es mecánico) con los grandes costos que tienen los aires acondicionados, decantan claramente la balanza a favor de los primeros.

En invierno, en cambio, los pozos pueden resultar insuficientes por si solos para aportar el calor necesario para la climatización de un edificio dependiendo de la latitud. Sin embargo, pueden ofrecer un importante precalentado del aire lo que supondrá un sustancial ahorro, ya que el salto térmico que tendrá que aportar el sistema de climatización artificial se verá reducido.

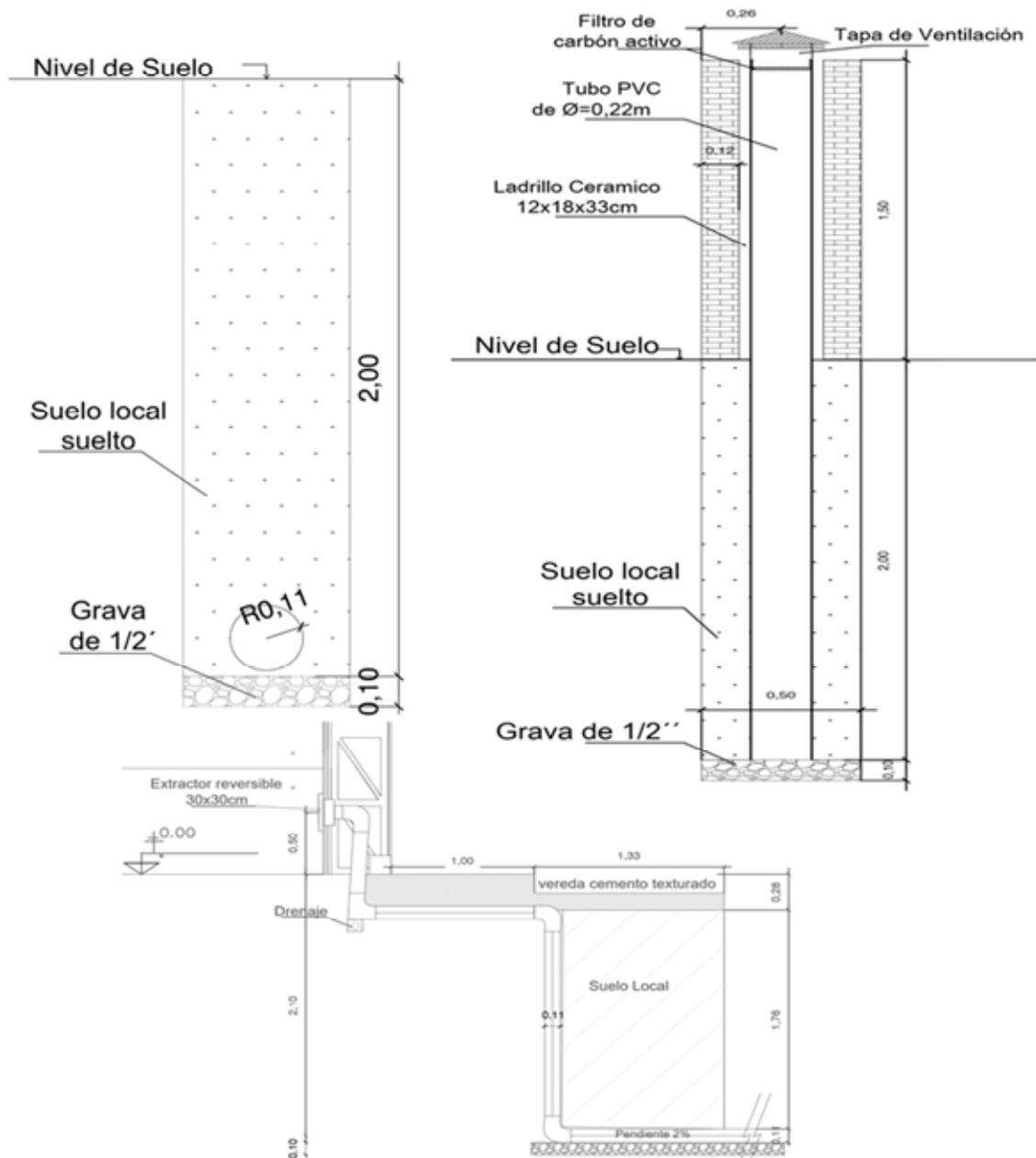


Figura 7: Detalles de la instalación de geotermia de baja entalpía..

Las ventajas de estos sistemas son numerosas: requieren una inversión mucho menor que una climatización reversible convencional, en especial si el diseño del edificio ya contempla dicha posibilidad, son de mantenimiento muy sobrio y completamente sostenibles y ecológicos. De acuerdo a los análisis y cálculos realizados es viable la aplicación del sistema para esta edificación en estudio y para su tipo de construcción (en seco), dada la posibilidad de adaptación del sistema sin la necesidad de modificar la estructura. Se ha realizado, hasta esta instancia de investigación, los cálculos y proyecto del diseño, y se estima que la aplicación en suelos loésicos permitiría según los cálculos, una disminución en el consumo de energía de aproximadamente un 25%, lo que implicaría además un ahorro económico.

REFERENCIAS

- Cabezas, A. M. (2013). Eficiencia energética a través de la utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real. Casa Pomaret (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Cárdenas, G. J. (2011). Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación. *Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario*, 9, 32-36.
- Carrasco, F. J. C. y Márquez, D. M. (2015). La energía geotérmica de baja entalpía. In *3C Tecnología Vol. 4, No. 3*, pp. 96-108. Área de innovación y Desarrollo, SL.
- Costantini, A. B., Carro Pérez, M. E., & Francisca, F. M. (2016). Evaluación del comportamiento térmico de una edificación reemplazando el material de la envolvente por suelo-cemento. In *XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. ASADES. La Plata.
- De Paepe, M. y Janssens, A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and buildings*, 35(4), 389-397.
- Iannelli, L. y Gil, S. (2012). Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol, 6(1), 100.
- Ministerio de Energía y Minería.(2015). Matriz Energética Actualizada de La Republica Argentina. <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366>
- Narsilio, G. A., Francisca, F., Ferrero, H., Bidarmaghz, A., Serrano, C., Carro Perez, M. E., .y Delacoste, E. (2015). Geothermal energy in loess: a detailed numerical case study for Cordoba. *From fundamentals to applications in geotechnics*, 704-711.
- Tzaferis, A., Liparakis, D., Santamouris, M., Argiriou, A., (1992). Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 18: 35-43.

ABSTRACT

The objective of this work is to highlight the use of low enthalpy geothermal energy as an economical and ecologically friendly option for collaboration in the air conditioning of environments. The calculations and design are made based on the thermal characteristics of the intervening parameters, both the soil and local climate and the materials of the construction envelope. It is determined, through thermal balances carried out on a BT6 free software created by Dilasoft, the energy, and economic analysis produced by the application of the low enthalpy geothermal system. The results obtained are satisfactory since the implementation of this type of system presents an economical and energetically efficient solution.

Keywords: calculation, shallow geothermal, loess, design, installation.

SECUESTRO DE METANO (CH₄) BAJO COBERTURA DE BOSQUE NATIVO

S. Ontiveros¹, S. Manrique², J. Franco³, D. Camacho⁴

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y Universidad Nacional de Salta (UNSa) – Avda. Bolivia 5150, A 44408 FVY Salta, Argentina. Tel.: 0387-4255533 – E-mail:

silvinaontiveros@yahoo.com.ar

Recibido 13/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: Se cuantificaron los flujos de metano (CH₄) en suelos de Bosques de Galería (BG) y Bosques de Filo (BF) (interfaz suelo-atmósfera), en diferentes épocas de registros (2016-2017), aplicando el método de la cámara estática. La tasa media de secuestro de CH₄ en BG (-11,87 ng. m⁻² s⁻¹) fue 6,5% superior a la del BF (-11,10 ng. m⁻² s⁻¹), aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($H=1,31$; $p=0,2515$). La tasa máxima en BG fue de -13,35 ng. m⁻² s⁻¹ y en BF de -12,01 ng. m⁻² s⁻¹. Se observó un comportamiento estacional de los flujos de CH₄ en BG ($H=18,31$; $p=0,0001$) y BF ($H=13,24$; $p=0,0013$), acorde con reportes anteriores. Se analizó la correlación entre la tasa de secuestro de CH₄ con parámetros ambientales. Este estudio aporta al conocimiento de los flujos de CH₄ en suelos forestales del NOA, de suma utilidad en futuros inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: bosque nativo, cambio climático, cámaras estáticas, suelos forestales, secuestro de metano.

INTRODUCCION

La concentración atmosférica de CH₄ se ha duplicado desde el inicio de la revolución industrial a un valor actual de 1.8 μl/l. Entre los gases de efecto invernadero (GEIs) emitidos a la atmósfera, el CH₄ presenta un mayor potencial de calentamiento global, en comparación al CO₂ (Hsu et al., 2009). En los suelos, el CH₄ es producido por metanogénesis bajo condiciones anaerobias y es consumido por microorganismos metanotróficos que usan O₂ y CH₄ para su metabolismo bajo condiciones aeróbicas (Dutaur y Verchot, 2007). Se considera que las mayores fuentes de emisiones netas de CH₄ provienen de la agricultura (IPCC, 2007) y de ambientes de suelos anaeróbicos, tales como humedales y arrozales (Li et al., 2002).

Por otra parte, en los ecosistemas forestales el CO₂, N₂O y CH₄ son las trazas principales de los gases intercambiados entre el suelo y la atmósfera (Lavoie et al., 2013). Esto ha generado que los ecosistemas terrestres sean considerados dentro de estrategias de mitigación, teniendo en cuenta que son reguladores vitales de las concentraciones atmosféricas de GEIs, y que una gran cantidad de dichos GEIs se producen y consumen a través de los procesos del suelo (Canadell et al., 2007). Por esta misma razón, los bosques –y en particular los suelos forestales- han sido identificados como los más eficientes sumideros con respecto a otros ecosistemas (Kolb, 2009).

El estudio de la capacidad de capturar CH₄ de los distintos ecosistemas forestales, como así, su respuesta frente a cambios de uso de suelo, resulta por tanto un insumo fundamental para estimar con precisión los inventarios de GEIs a escala local, regional o global. Sin embargo, no hay suficiente información generada al respecto (Kooch et al., 2015) y se han encontrado unos pocos estudios sobre

1 Becaria doctoral del CONICET

2 Investigadora Asistente del CONICET.

3 Investigadora Adjunta del CONICET

4 Estudiante Ing. Recursos Naturales y Medio Ambiente

intercambio de GEIs suelo-atmósfera, principalmente en regiones templadas y/o tropicales (Javed Igbal et al., 2009). Particularmente en Argentina, estudios de mediciones directas de flujos de GEIs solo se reportaron para plantaciones de diferentes especies arbóreas (*Eucalyptus viminalis*, *Pinus radiata*), plantaciones de especies mixtas deciduas y pasturas en la Pampa Argentina (Priano et al., 2013). Y más recientemente se han comenzado a estudiar los bosques del noroeste del país (Ontiveros et al., 2016).

El objetivo de este estudio es aportar en el entendimiento de la dinámica de los flujos de CH₄ en suelos de bosques nativos de la provincia de Salta, observando su relación con variables ambientales edáficas y microambientales, por medio del monitoreo y cuantificación de dicho gas en diferentes épocas del año (2016-2017). Se aplica la técnica de la cámara estática cerrada, ya que este método presenta mayor facilidad técnica, práctica y operacional frente a otros existentes (Butterbach-Bahl et al., 2011; Denmead., 2008). La CE es adecuada para detectar flujos trazas de gases, tanto de CH₄ como de NO₂ (Lapitan et al., 1999) y puede aplicarse además para determinar los flujos de CO₂ (Pumpanen et al., 2004). El enfoque estático basado en cámara descrito aquí es un método eficiente para medir el flujo de GEI de los sistemas del suelo, como lo demuestran los primeros estudios en la zona (Ontiveros et al., 2016). La información generada contribuirá al armado de una base de datos que será de utilidad en futuros inventarios nacionales de GEI.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Reserva Privada Campo Alegre (RPCA), perteneciente al Club de Amigos de la Montaña de Salta, departamento La Caldera (26 km hacia el norte de la ciudad de Salta Capital). La RPCA está ubicada sobre el faldeo occidental de las sierras Subandinas bordeando el embalse Campo Alegre por el este, entre las coordenadas 24°34' latitud sur y 65° 21' longitud oeste (Figura 1). El clima es subtropical serrano con estación seca, con una precipitación media anual de 800-900 mm, concentradas (80%) entre Diciembre-Marzo. La temperatura media anual es de 17°C. Los suelos son pocos desarrollados, con texturas pesadas con un 40% de arcilla en superficie que incrementa en profundidad (60%) y escaso desarrollo de un horizonte B (Neumann et al., 2009).

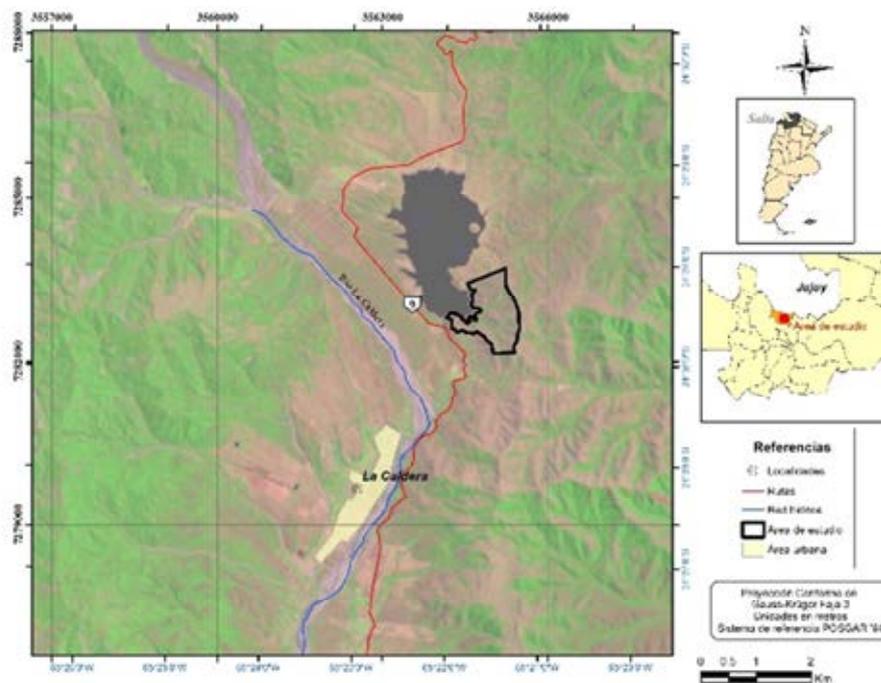


Figura 1: Ubicación y vías de acceso de la Reserva Privada de Campo Alegre-La Caldera (Salta).

La vegetación corresponde a una zona transicional entre las Provincias Fitogeográficas de Yungas y Chaco (Cabrera, 1976), pudiendo identificarse diferentes facetas de estos ecosistemas definidos por factores de exposición, pendiente y altitud (Ontiveros et al., 2015). El estudio se centró en suelos forestales de estratos definidos como Bosque de Galería (BG) y Bosque de Filo (BF). El BG es un bosque húmedo mejor constituido que el segundo, localizado en las quebradas y desagües naturales, que ocupa cerca de 12 ha (11,15% de la superficie total de RPCA). Muestra especies típicas del ecosistema de Yungas y fue moldeado por perturbaciones antrópicas y factores climáticos locales, hallándose en proceso de restauración natural (Ontiveros *et al.*, 2018). Las especies dominantes (con mayor área basal) son *Scutia buxifolia*, *Sebastiania commersoniana*, *Allophylus edulis* y *Blepharocalyx salicifolius*, siendo además junto con *Sebastiania brasiliensis* las especies en mayor densidad (Ontiveros et al., 2018). El BF es un bosque nativo más seco que se sitúa sobre las divisorias de aguas de las serranías circundantes a la Reserva. También se trataría de un bosque degradado por perturbaciones antrópicas (incendios de pastizal, sobrepastoreo animal, uso del bosque), las cuales operaron con mayor intensidad antes de que la zona fuera convertida en Reserva (Ontiveros et al., 2018). La vegetación en este sector es predominantemente de Chaco serrano, ocupando cerca de 22 ha (20,4% de la superficie total de RPCA). Las especies dominantes son: *Acacia caven* y *Vassobia breviflora*, siendo las mismas junto con *Sapium haematospermum* las especies con mayor densidad.

Mediciones de flujo de CH₄

Entre las diferentes técnicas existentes, se optó por registrar los flujos de CH₄ mediante el método de la cámara estática cerrada (CE), considerando que es uno de los más conocidos y sencillos para llevar a cabo estudios de GEIs en los ecosistemas terrestres. Las CE empleadas fueron construidas de acero inoxidable y tapa de grilón, equipadas con un orificio de caucho y válvula para extraer las muestras de gases (diámetro de 16 cm y altura total de 17 cm). Las mismas se clavaron 5 cm en suelos forestales (sin retirar el mantillo), con un diseño aleatorio. Los muestreos se realizaron en Noviembre del año 2016 (N16), y Marzo (M17) y Setiembre del año 2017 (S17), estas mediciones correspondieron a la continuación del periodo de muestreo reportado en Ontiveros *et al.* (2016). Las mediciones se hicieron en los mismos rangos horarios (10:00 am-17:00 pm), utilizando 3 cámaras por punto de muestreo (que consistió en parcelas de 100 m²). Considerando que las estimaciones de flujos mejoran al tomar mayor cantidad de muestras a expensas de un menor número de cámaras (Levy *et al.*, 2011), se tomaron 5 muestras de gases (colectadas en jeringas de 20 ml) por cámara, en intervalos de tiempo regulares (0, 10, 20, 30, 40 minutos), para determinar el aumento de las concentraciones de los gases (Itoh et al., 2012; Luo y Zhou et al., 2006). Posteriormente las muestras de gases fueron conservadas en viales de 12 ml, para analizar la concentración (ppm) en laboratorio (Figura 2).



Figura 2: Muestreo (arriba), Cámara estática (CE) (abajo izquierda) y toma de muestras y trasvase a viales (abajo derecha).

Determinación de la Concentración de CH₄ (ppm)

La concentración de CH₄ (ppm) se determinó en el Laboratorio de Investigaciones en Física e Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro en la Provincia de Buenos Aires (Tandil), mediante cromatografía gaseosa (GC) en un equipo Agilent, 7890A equipado con un FID y una columna de 1,8-m Poropak Q (80/100 mallas). Las temperaturas del horno, el inyector y detector estaban en 50, 250 y 250 °C, respectivamente. La velocidad de flujo del gas portador (He) fue de 30 ml/min. Los gases de la llama (H₂ y O₂) se fijaron en 30 y 400 ml/min, respectivamente.

Determinación de los Flujos de CH₄

Los flujos de CH₄ (ng. m⁻² s⁻¹), son expresados en unidades de masa sobre una determinada superficie y tiempo y fueron determinados por el incremento de la concentración de los gases en la cámara (ppm), durante un cierto periodo de tiempo (Pumpanen et al., 2004).

La primera aproximación en la determinación de los flujos es realizar un gráfico de regresión lineal simple (concentración vs tiempo) extrayendo del mismo, el valor de la pendiente (ppm/min). Se tomó como criterio utilizar los resultados de las cámaras cuya regresión tuviera un ajuste de $R^2 \geq 0,7$. Se asumió que las pendientes negativas (-) indicarían un secuestro del gas (flujos negativos) y pendientes positivas (+) indicarían emisiones de CH₄ (flujos positivos). Los flujos se calcularon aplicando la *Ley de Gases Ideales*, determinando la concentración en moles (moles/s cm³) y realizando el pasaje a unidades de masa (ng/s cm³). El área de la cámara se obtuvo con el volumen de la misma (cm³) a partir de la altura promedio de la cámara (cm) clavada al suelo. Se consideraron condiciones normales de presión (1 atm).

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1)$$

Donde:

P: presión (atm)

V: volumen de la cámara (cm³)

n: moles de gas

R: constante = 0,0821 l·atm·K⁻¹·mol⁻¹

T: temperatura interna de la cámara (°C)

Variables edáficas y microclimáticas

En cada punto donde fuera colocada una cámara, se registraron de manera simultánea variables edáficas y microclimáticas. Se colectaron muestras compuestas de suelo (al lado de cada cámara), a una profundidad de 0-10 cm (Figura N°1). Posteriormente en laboratorio se determinaron las siguientes variables: densidad aparente (Da), contenido de carbono orgánico (Co), humedad del suelo (Hu), porosidad (Po), porcentaje de poros cubiertos con agua (PPCA). La Da se determinó mediante el método del cilindro. Las muestras fueron secadas en estufa durante 72 horas a 105 °C. La Da fue calculada de la siguiente manera:

$$Da \text{ (g/cm}^3\text{)}: Ps/Vc \quad (2)$$

Donde:

Da: Densidad aparente (g/cm³)

Ps: peso seco de la muestra (g)

Vc: volumen del cilindro (100 cm³)

El Co se estimó mediante el método de Walkley y Black. (1934). La Hu se determinó mediante el método gravimétrico según:

$$Hu \text{ (\%)}: (Ph/Ps) \cdot 100: (Pt-Ps/Ps) \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

Hu: humedad del suelo (%)

Ph: peso del agua existente en la masa del suelo (g)

Ps: peso de la muestra seca (g)

Pt: peso de la muestra húmeda (g)

La Po y el PPCA (porcentaje de poros cubiertos de agua), se estimaron a partir de los resultados de humedad y densidad aparente:

$$Po \text{ (\%)}: 1 - Da/Dr \quad (4)$$

Donde:

Po: porosidad del suelo (%)

Da: densidad aparente (g/cm^3)
 Dr: densidad real: $2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$

$$\text{PPCA} (\%) = \text{Hu} * \text{Da} * (1/\text{Po}) \text{ (USDA, 2004)} \quad (5)$$

Donde:
 PPCA: porcentaje de poros llenos de agua (%)
 Hu: humedad del suelo (%)
 Da: densidad aparente (g/cm^3)
 Po: porosidad del suelo (%)

La temperatura ambiente (T_a) se midió con un sensor externo, la temperatura interna de la cámara (T_i) mediante termocupla instalada en el interior de cada cámara y la temperatura del suelo (T_s), se midió con un termómetro para suelo. Estas variables se midieron en cada extracción de las muestras de CH_4 .

Análisis de los datos

Los resultados se procesaron con el software Infostat (2016), evaluando los flujos de CH_4 comparativamente entre unidades ambientales y épocas de muestreo dentro de cada sitio (BG y BF), aplicando la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis y comparaciones post hoc, empleando un nivel de significancia de $\alpha: 0,05$. Para conocer la relación entre los parámetros microambientales (edáficos y climáticos) y los flujos de CH_4 , se realizaron correlaciones múltiples (coeficiente de Spearman).

RESULTADOS

Los flujos de CH_4 fueron negativos (-) para los suelos forestales de ambas unidades ambientales estudiadas (BG y BF), indicando que en las épocas muestreadas, estos suelos capturan o secuestran CH_4 atmosférico. En otras palabras, prevalecen los mecanismos de oxidación por encima de los mecanismos de reducción del CH_4 . La tasa media de secuestro de CH_4 obtenida en BG es 6,5% superior a la del BF, aunque estas diferencias no resultaron estadísticamente significativas ($H=1,31$; $p=0,2515$) (Tabla 1).

	BG		BF	
	Media	DS	Media	DS
Flujo medio CH_4 ($\text{ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	-11,87	1,86	-11,10	0,70

Tabla 1: Flujo medio de CH_4 ($\text{ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en cada tipo de bosque. Medias y desvío estándar (DS).

Un análisis al interior de cada sitio, mostró que en BG se obtuvo una tasa mínima de secuestro de CH_4 de $-9,69 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y una tasa máxima de $-13,35 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Mientras que en BF, la tasa mínima de secuestro fue de $-10,3 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y la máxima de $-12,01 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Tabla 2).

Época de muestreo	Estadístico	Unidad ambiental			
		BG		BF	
N16	Media	-12,56	a	-10,30	b
	DS	1,21		0,03	
M17	Media	-9,69	b	-11,29	a
	DS	0,24		0,03	
S17	Media	-13,35	a	-12,01	a
	DS	1,38		0,04	
Flujo medio CH_4 ($\text{ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Media	-11,87		-11,10	
	DS	1,86		0,70	

Tabla 2: Flujo de CH_4 ($\text{ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) registrado por época de muestreo en cada unidad ambiental. Medias y desvío estándar (DS). El signo negativo representa mecanismos de captura de CH_4 . Letras distintas en una misma columna indican significancia estadística ($p < 0,05$).

Mientras que en BF, las diferencias significativas se dieron entre los registros del año 2016 (N16) y los del 2017 (M17 y S17) ($H=13,24$; $p=0,0013$) (Tabla 2). Los resultados de las variables microambientales obtenidas en cada tipo de bosque, se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3).

Variables	Unidad Ambiental					
	BG			BF		
	N16	M17	S17	N16	M17	S17
Da (g/cm ³)	0,99±0,19	1,18±0,11	1,84±0,1	1,07±0,12	1,20±0,04	1,75±0,17
Co (%)	2,46±0,51	3,39±0,89	2,87±0,2	2,48±0,30	4,17±0,30	2,97±0,03
Po (%)	0,63± 0,07	0,56±0,04	0,31±0,04	0,59±0,04	0,55±0,02	0,34±0,06
PPCA (%)	13,83±2,53	2,88±0,77	16,27±1,51	15,12±2,75	3,45±1,06	10,3±1,34
Hu (%)	38,36±7,76	5,67±1,97	12,83±1,6	34,59±1,40	6,33±1,53	9,00±1,00
Ti (°C)	23,64±4,23	19,25±0,78	18,29±0,78	22,27±1,22	18,34±0,20	20,81±0,13
Ta (°C)	22,13±4,36	16,7±1,12	17,07±0,33	23,23±1,74	17,88±0,91	18,13±0,34
Ts (°C)	14,40±0,30	16,81±0,54	14,37±0,28	16,50±0,80	15,88±0,27	16,49±0,76

Tabla 3: Variables microambientales de BG y BF. Medias y desvío estándar (±).

Los resultados de la correlación entre la tasa de secuestro de CH₄ con las variables edáficas y microambientales se observan en las siguientes tablas (Tablas 4 y 5):

	Flujo CH ₄	Da (g/cm ³)	Co (%)	Po (%)	PPCA (%)	Hu (%)	Ti (°C)	Ta (°C)	Ts (°C)
Flujo CH ₄	1	0,49	0,85	0,49	0,37	0,36	0,71	0,38	0,4
Da (g/cm ³)	0,21	1	0,05	9,10E-04	0,01	0,06	0,07	0,5	0,02
Co (%)	-0,06	-0,58	1	0,05	0,16	0,76	0,6	0,03	0,82
Po (%)	-0,21	-1	0,58	1	0,01	0,06	0,07	0,5	0,02
PPCA (%)	0,27	0,76	-0,43	-0,76	1	1,80E-04	0,26	0,44	0,01
Hu (%)	0,29	0,56	-0,1	-0,56	0,88	1	0,29	0,86	7,30E-04
Ti (°C)	0,11	-0,54	-0,17	0,54	-0,34	-0,33	1	0,43	0,02
Ta (°C)	-0,27	0,2	-0,63	-0,2	0,23	0,06	0,24	1	0,82
Ts (°C)	-0,25	-0,71	0,07	0,71	-0,82	-0,83	0,71	0,07	1

Tabla 4: Correlación de flujos de CH₄ con variables microambientales en BG. Coeficiente de Spearman/probabilidades.

	Flujo CH ₄	Da (g/cm ³)	Co (%)	Po (%)	PPCA (%)	Hu (%)	Ti (°C)	Ta (°C)	Ts (°C)
Flujo CH ₄	1	0,34	0,34	0,34	0,65	0,96	0,29	0,95	0,65
Da (g/cm ³)	-0,43	1	0,08	0,03	0,04	0,1	3,10E-04	0,14	0,14
Co (%)	0,43	-0,77	1	0,08	0,06	0,08	0,04	0,34	0,08
Po (%)	0,43	-1	0,77	1	0,04	0,1	3,10E-04	0,14	0,14
PPCA (%)	-0,2	0,94	-0,83	-0,94	1	0,07	0,01	0,18	0,11
Hu (%)	-0,03	0,72	-0,75	-0,72	0,78	1	0,13	0,32	0,35
Ti (°C)	-0,52	0,99	-0,84	-0,99	0,93	0,69	1	0,17	0,1
Ta (°C)	-0,03	0,66	-0,43	-0,66	0,6	0,49	0,64	1	0,08
Ts (°C)	-0,2	0,66	-0,77	-0,66	0,71	0,46	0,72	0,77	1

Tabla 5: Correlación de flujos de CH₄ con variables microambientales en BF. Coeficiente de Spearman/probabilidades.

La relación de los factores microambientales (edáficos y climáticos) estudiados con la tasa de secuestro de CH₄ por cámara es entre moderada y baja, aunque en ningún caso resultó significativa.

Para BG, los factores edáficos son los que muestran una relación más fuerte con la tasa de secuestro de CH₄ -mayormente de influencia positiva- aunque con bajos valores de coeficientes, oscilando entre r=0,29 (Hu), r=0,27 (PPCA) y r=0,21 (Da). Solo Po influye de manera inversa (y débil) en el secuestro y la relación de Co es prácticamente despreciable. Entre los factores climáticos, se destaca Ta y Ts mostrando relaciones débiles y de influencia inversa.

En el caso de BF, también los factores edáficos muestran relaciones de mayor fuerza con la tasa de secuestro de CH₄ que en BG, con coeficientes de r=0,43 para Co y Po (directos) y de idéntica magnitud pero sentido inverso para Da. Entre las variables climáticas, se destaca la Ti con una relación moderada e inversa (r=0,52) con la tasa de secuestro de CH₄.

Por otra parte se obtuvieron correlaciones lineales significativas y lógicas entre otras variables edáficas, tales como: Po y PPCA (*correlación directa, $p=0,01$*) en ambos sitios, Po y Co (*directa, $p=0,05$*) en BG, Co y Da (*inversa, $p=0,05$*) en BG, Hu y PPCA (*directa, $p<0,05$*) en BG. Mientras que en BF se obtuvo una correlación significativa, entre Po y PPCA (*directa, $p=0,04$*).

DISCUSIÓN

Tasa de secuestro de CH₄ por unidad ambiental y época de muestreo

En términos generales, las mayores áreas de secuestros de CH₄ se encuentran en el Hemisferio sur (Tremblay et al., 2005; Ridwell et al., 1999), donde los bosques tropicales, son los principales sumideros de carbono, que a su vez presentan los mayores secuestros de CH₄ (Tremblay et al., 2005; Smith et al., 2003). En nuestro caso, durante el periodo evaluado, los suelos forestales de ambas unidades ambientales (BG y BF) se comportaron como sumideros de CH₄ atmosférico, es decir se obtuvieron flujos negativos

(-). Con respecto a la tasa media de secuestro de CH₄, se obtuvo -11,87 ng. m⁻² s⁻¹ en BG y -11,10 ng. m⁻² s⁻¹ en BF. Siendo la tasa media de secuestro de CH₄ de BG 6,5% superior a la del BF, aunque estas diferencias no resultaron estadísticamente significativas (Tabla 1).

Realizando un análisis hacia el interior de cada unidad ambiental, en BG obtuvimos que las tasas máximas de secuestro de CH₄ fueron en los meses de primavera: S17 y N16 (-13,35 ng. m⁻² s⁻¹ y -12,56 ng. m⁻² s⁻¹) y la mínima tasa de secuestro de CH₄ en otoño: M17 (-9,69 ng. m⁻² s⁻¹), coincidiendo con los resultados de mediciones reportadas en un periodo anterior (Ontiveros et al., 2016). Se observó una clara estacionalidad, con diferencias estadísticamente significativas entre el secuestro de CH₄ de primavera con respecto a otoño; coincidiendo los máximos secuestros con elevados contenidos de humedad del suelo (Hu) y alta temperatura ambiente (Ta) (Tablas 2 y 3).

Con respecto a las tasas de secuestro de CH₄ en BF, los máximos valores se registraron entre los meses de S17 y M17 y el mínimo secuestro en N17, siendo esta diferencia estadísticamente significativa (Tabla N°2). En esta unidad ambiental no se observa una clara estacionalidad. Sin embargo, el valor obtenido de máximo secuestro fue en setiembre (-12,01 ng. m⁻² s⁻¹), lo cual coincide con la tasa máxima que también fue obtenida en la misma época (aunque con un valor absoluto ligeramente superior), en reportes anteriores (Ontiveros et al., 2016).

En bosques tropicales de Colombia (Municipio de Alcalá), se reportó una tendencia similar de máximo secuestro de CH₄ en época de primavera-verano (-15,06 a -21,03 ng. m⁻² s⁻¹) (Carvajal Venegas, 2008); aunque con valores de mayor magnitud que los registrados en el presente.

Se encuentra bien documentado que los flujos de CH₄ en los suelos, presentan fuertes variaciones estacionales (Ridwell et al., 1999; Potter et al., 1996), en donde las variaciones estacionales en el secuestro de CH₄ son inducidas por las diferencias en las precipitaciones y temperaturas, observando que las lluvias afectan fuertemente el secuestro anual de CH₄, como resultado de su efecto sobre la humedad del suelo y la difusividad del gas (Borken et al., 2003). Otros estudios (Guckland et al., 2009) evidenciaron que las diferencias en la precipitación durante el periodo de crecimiento vegetal (mayo-septiembre) en bosques deciduos templados (Thuringia-Alemania) provocaron una variación interanual significativa del secuestro de CH₄.

Relación entre la tasa de secuestro de CH₄ y parámetros ambientales

La tasa de producción de CH₄ depende de la distribución de los microorganismos a lo largo del perfil del suelo, la cual no es uniforme debido a la variabilidad de nutrientes en los distintos microambientes presentes (Carrillo, 2003). Por otra parte, el transporte del gas está condicionado fuertemente por las propiedades físicas del suelo; la difusividad de cada gas en el medio es la que controla el movimiento y ésta varía en tiempo y profundidad porque depende de factores como la textura, porosidad, densidad aparente y el contenido de agua en el suelo (Dutaur y Verchot, 2007; Smith et al., 2003, 2000; Ridwell et al., 1999; Potter et al., al 1996). Ejerciendo algunos factores mayor influencia sobre otros; tales como el contenido de humedad del suelo, que influye directamente en la difusividad del gas (Guckland et al., 2009; Borken et al., 2006; Borken et al., 2000; Smith et al., 2000). En este sentido, entendemos que la

dinámica de secuestro de CH₄ en la Interfaz Suelo Atmósfera (ISA) estaría determinado por procesos físicos tales como la difusividad del gas y por procesos microbianos tales como estructura-actividad de bacterias metanotróficas principalmente.

Relaciones inversas entre el secuestro de CH₄ y la humedad del suelo se reportaron en varios trabajos realizados en ecosistemas de plantaciones (Pampa-Argentina), bosques prístinos y bosques boreales (Priano et al., 2013; Price et al., 2004; Smith et al., 2000; Dobbie and Smith., 1996). En general, esta correlación inversa, resulta esperable porque la humedad del suelo influye en el proceso de difusión del gas, ya que cuando mayor es el contenido de humedad del suelo, menor es el secuestro de CH₄, por la limitación del agua en la difusión del gas hacia el interior del suelo. Esta situación se obtuvo en suelos forestales de BF, aunque la correlación entre estas variables mostró tener una relación débil y no significativa.

Por otra parte, en suelos de la unidad ambiental de BG obtuvimos una situación contraria, donde la correlación entre la tasa de secuestro de CH₄ y la humedad del suelo fue directa, lo cual no resulta ser lo esperable, ya que a elevados contenidos de humedad en el suelo, incrementaría la actividad de bacterias metanogénicas y por ende las emisiones de CH₄. Teniendo en cuenta, además que el suelo de este bosque tiene mayor cantidad de humedad (en comparación con suelos de BF), lo cual es acorde al tipo de textura que presenta mayor proporción de material de fracción fina (limo y arcilla: granulometría: 0,074-0,002 mm) y menor proporción de material de fracción gruesa (arena: granulometría: 2-0,074 mm), tratándose de suelos con mayor capacidad de retención de humedad (resultados no publicados). Por lo tanto, es evidente que, en este caso, existen otros factores que estarían condicionando la oxidación de CH₄ en suelos del bosque de galería, tales como los procesos microbianos.

El estudio del comportamiento de las comunidades metanotróficas y metanogénicas en la zona, podría aportar al entendimiento del secuestro de CH₄, ya que como es sabido la estructura y actividad de metanótrofos podrían tener influencia en la velocidad de secuestro de CH₄ (Borken et al., 2003) y dicha actividad (oxidación de CH₄) estaría condicionada por el contenido hídrico del suelo, nitrógeno y Ph (Priano et al., 2013; Smith et al., 2003; Adamsen y King, 1993; Mosier et al., 1991). El estrés hídrico restringe la actividad de metanótrofos y puede disminuir el secuestro de CH₄ (Del Grosso et al., 2000). De similar manera, las bajas temperaturas o cambios bruscos, afectan también la actividad microbiana y por ende el secuestro de CH₄ (Castro et al., 1995).

Por otra parte, también se considera que la temperatura del suelo influye en la difusividad del gas CH₄ (Del Grosso et al., 2000; Castro et al., 1995), aunque podría tener mayor influencia sólo en un rango de valores (-5°C y 10°C) (Castro et al., 1995). Los registros de temperatura en nuestro trabajo, estuvieron claramente vinculados con los secuestros de CH₄, solo para Ti en BF (en una relación inversa y moderada), pero no así en BG, por lo cual no se puede observar una clara tendencia en relación a la tasa de secuestro de CH₄.

Priano et al. (2013) destacan que el porcentaje de poros cubiertos con agua (PPCA) limita el transporte del CH₄ atmosférico hacia las capas inferiores del suelo. La correlación entre la tasa de secuestro de CH₄ y el PPCA no fue significativa en ninguno de los sitios. Sin embargo, este parámetro (PPCA), se encuentra fuertemente correlacionado de manera directa con el contenido hídrico del suelo (Hu), siendo una relación significativa en BG (idéntico a lo hallado por Priano et al., 2013). Como es de esperar, estas variables se vinculan fuertemente con la densidad aparente de suelo y de manera significativa. En general, valores altos de densidad aparente implican una reducción en la difusividad del gas debido a la pérdida de macroporos generada por la compactación (Smith et al., 2000).

La dinámica del secuestro de CH₄ en la interface suelo-atmósfera es muy variable y compleja, y requiere considerar la influencia de factores ambientales (edáficos y microambientales), como así también procesos microbiológicos, los cuales a su vez, muestran cambios notorios en pocas distancias en ecosistemas de orografía marcada como los estudiados. La continuidad de los estudios en la zona, permitirá ajustar los resultados preliminares obtenidos y lograr una mayor claridad en las tendencias detectadas. La caracterización de estos ecosistemas en función de su comportamiento y participación

en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos, posibilitará a futuro monitorear la influencia de diferentes usos y manejos del suelo y diseñar estrategias regionales exitosas de mitigación y adaptación al cambio climático (Attard et al., 2011).

Esto cobra especial importancia en el marco de los acuerdos internacionales sobre cambio climático que el país ha firmado, ya que el sector de cambio de uso del suelo y silvicultura (CUSS), que incluye las coberturas boscosas, ocupa el tercer lugar de importancia a nivel nacional (con el 21.1% de las emisiones totales de GEIs) (Barros et al., 2014).

CONCLUSIONES

Se determinaron las tasas de secuestro de CH₄ en suelos forestales de las unidades ambientales estudiadas, obteniendo en BG una tasa media de $-11,87 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y en BF una tasa media de $-11,10 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, siendo la tasa media en BG 6,5% superior al del BF, dicha diferencia no fue estadísticamente significativa ($H=1,31$; $p=0,2515$).

La tasa máxima de secuestro de CH₄ en BG fue $-13,35 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ la tasa mínima de $-9,69 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Mientras que en BF la tasa máxima de secuestro de CH₄ fue de $-12,01 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y la mínima de $-10,3 \text{ ng. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En BG los secuestros de CH₄ registrados en primavera (N16-S17) fueron estadísticamente significativos ($H=18,32$; $p=0,0001$) con los registrados en otoño (M17), mostrando una clara estacionalidad donde los máximos secuestros (primavera), coinciden con elevados contenidos de humedad del suelo (Hu) y altas temperatura ambiente (Ta), acorde a lo reportado anteriormente. En suelos de BF las diferencias significativas se dieron entre los registros del año 2016 (N16) y los del 2017 (M17 y S17) ($H=13,24$; $p=0,0013$). En BF no se observa una clara estacionalidad, sin embargo la tasa máxima de secuestro se obtuvo en setiembre, coincidiendo con la tasa máxima obtenida en la misma época en reportes preliminares.

La correlación inversa entre el secuestro de CH₄ y la humedad del suelo, obtenida en BF fue reportada en varios trabajos. Mientras que la situación contraria obtenida en BG, no resultaría ser lo esperable, por lo cual otros factores tales como los procesos microbianos, estarían influyendo en la oxidación de CH₄, por lo cual el estudio del comportamiento de las comunidades metanotróficas y metanogénicas en la zona, podría aportar al entendimiento del secuestro de CH₄. Por otra parte mayores estudios permitirán ajustar los resultados preliminares obtenidos en esta unidad ambiental.

Este trabajo contribuye con los primeros datos sobre los flujos de GEIs en coberturas boscosas del noroeste del país, lo cual posibilitará la construcción de una base de datos regional. La comprensión de los flujos de GEIs en el sector de cambio de usos del suelo, contribuirá al avance en la definición de factores de emisiones propios a nivel regional y nacional para futuros inventarios de GEI.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por los proyectos N° 36-88-506 (Secretaría de Políticas Universitarias) y PIP N° 112-2015-01-00035 (CONICET). Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la beca doctoral de S. Ontiveros. Nuestro agradecimiento a la Dra. María Eugenia Priano y al Laboratorio de Investigaciones en Física e Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro (Tandil, Buenos Aires) por el análisis de las muestras de gases. Al Club de Amigos de la Montaña de Salta por permitir realizar estas investigaciones en la Reserva de su propiedad, y en especial, al Sr. Guillermo Ellenrieder. A los alumnos de la carrera de Ing. RN y MA-UNSa, que colaboraron con las tareas de campo. A la Catedra de Química Inorgánica-Facultad de Ciencias Exactas y Laboratorio de Suelos-Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta. Al Laboratorio de Suelos de la estación INTA-Cerrillos, Salta.

REFERENCIAS

- Adamsen, A. P. S.; King, G. M. (1993) Methane Consumption in Temperate and Subarctic Forest Soils: Rates, Vertical Zonation, and Responses to Water and Nitrogen. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, Vol. 59, 2, pp.485-490.
- Attard E., Recous S., Chabbi, A., De Berranger C., Guillaumaud N., et al. (2011). Soil environmental conditions rather than denitrifier abundance and diversity drive potential denitrification after changes in land uses. *Global Change Biology*. 17: 1975–1989.
- Barros V. y Vera, C. (eds.). (2014). Cambio climático en Argentina: tendencias y proyecciones. Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Buenos Aires, Argentina. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina (SAyDS).
- Borken W., Davidson E., Savage K., Sundquist E., Steudler P. (2006). Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 1388–1395.
- Borken W., Gröndel S., Beese F. (2000). Potential contribution of *Lumbricus terrestris* L. to carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from a forest soil. *Biology and Fertility of Soils* 32, 142–148.
- Borken W., Xu Y., Beese F. (2003). Conversion of hardwood forests to spruce and pine plantations strongly reduced soil methane sink in Germany. *Global Change Biology* 9, 956–966.
- Butterbach-Bahl K., Kiese R y Liu C. (2011). Measurements of biosphere-atmosphere Exchange of CH₄ in terrestrial ecosystems. *Methods in enzymology*. 1st ed, 495, 271-87.
- Cabrera A. (1976). Regiones Fitogeográficas de Argentina. Buenos Aires (Argentina): ACME. 87 p.
- Canadell J., et al. (2007). Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks. *Environ. Sci. Policy*, 10, 370–384.
- Carrillo L. (2003) Microbiología Agrícola, Capítulo 3. Universidad Nacional de Salta., ISBN 987-9381-16-5 (<http://www.unsa.edu.ar/matbib>).
- Carvajal Venegas A. (2008). Relación del Carbono y nitrógeno del suelo con usos y coberturas del terreno en alcala, Valle del Cauca. Andres Felipe Terreno en Alcala, Valle del Cauca. Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Ciencias Ambientales. Maestría en Ecotecnología. Tesis Magister Scientiae en Ecotecnología.
- Castro M., Steudler P., Melillo J., Aber J., Bowden R. (1995). Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycles* 9, 1-10. *Change Biology* 6, 791–803.
- Del Grosso S.; Parton W; Mosier A.; Ojima D.; Potter C., et al. (2000) General CH₄ oxidation model and comparisons of CH₄ Oxidation in natural and managed systems. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.14, pp.999-1019.
- Denmead O. (2008). Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant and Soil*, 309,5-24.
- Di Rienzo J., Casanoves F., Balzarini M., Gonzalez L., Tablada M., et al. InfoStat versión (2016). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Dobbie K., Smith K. (1996). Comparison of CH₄ oxidation rates in woodland, arable and set aside soils. *Soil Biol Biochem* 28:1357–1365.
- Dutaur L., Verchot L., (2007). A global inventory of the soil CH₄ sink. *Glob. Biogeochem. Cycles* 21 (n/a), <http://dx.doi.org/10.1029/2006GB002734>.
- Guckland A., Flessa H., Prenzel J. (2009). Controls of temporal and spatial variability of methane uptake in soils of a temperate. *Soil Biology & Biochemistry* 41 (2009) 1659–1667 deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L). Journal homepage: www.elsevier.com/locate/soilbio
- Hsu Y et al., (2009). Strategies to lower greenhouse gas level by rice agriculture. *Journal of Biotechnology*, 8(2), 126–132.
- IPCC (2007): Cambios Climáticos 2007: Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, 996 pp.

- Itoh M. et al. (2012). Effects of soil water status on the spatial variation of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes in tropical rain-forest soils in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Ecology*, 28,557-570.
- Javed Iqbal. (2009). Temporal variability of soil-atmospheric CO₂ and CH₄ fluxes from different land uses in mid-subtropical China. *Atmospheric Environment* 43 (2009):5865–5875.
- Kolb S. (2009). The quest for atmospheric oxidizers in forest soils. *Environmental Microbiology Reports* 1, 336-346.
- Kooch Y., Darabi S., Hosseini S. (2015). Effects of pits and mounds following windthrow events on soil features and greenhouse gas fluxes in a temperate forest. *Pedosphere*. 25(6): 853–867. www.elsevier.com/locate/pedosphere.
- Lapitan R., Wanninkhof R., Mosier A (1999): Methods for stable gas flux determination in aquatic and terrestrial systems. In *Approaches to Scaling Trace Gas Fluxes in Ecosystems*. Ed. AF Bouwman, pp. 31–66, Elsevier Science, Amsterdam.
- Lavoie M., Kellman L., Risk D. (2013). The effects of clear-cutting on soil CO₂, CH₄, and N₂O flux, storage and concentration in two Atlantic temperate forests in Nova Scotia, Canada. *For Ecol Manag.* 304: 355–369.
- Levy P., Gray A., Leeson S., Gaiawyn J., Kelly M., et al. (2011). Quantification of uncertainty in trace gas fluxes measured by the static chamber method. *Eur J Soil Sci* 62:811–821.
- Li C., Qiu J., Frohling S., Xiao X., Salas W., et al. (2002). Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980e2000. *Geophysical Research Letters* 29, 33-41e; 33-34.
- Luo Y. y X. Zhou. (2006). Soil respiration and the environmental. Elsevier, Burlington, MA, EUA.
- Mosier A.; Schimel D.; Valentine D.; Bronson K.; Parton W. (1991) Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature*, Vol.350, 6316, pp.330-332.
- Nuemann R., Garrido J., Lisi F., Matalía C., Samariago J. (2009). Reserva forestal y de fauna en Campo Alegre, Proyecto C.A.M. Informe de Club Amigos de la Montana (CAM), Personería Jurídica Nro. 3939 San Luis N 510. 2do. Piso. (4400) Salta. Argentina. Pp 1-14.
- Ontiveros S., Manrique S., Franco J. (2016). Flujos de metano en suelos forestales, dinámica y relación con factores edáficos y ambientales. XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES) (La Plata, 2016). ISBN: 978-987-29873-0-5.
- Ontiveros S., Manrique S., Franco J. (2018). Flujos de metano (CH₄) en suelos forestales de bosque nativo de Yungas y Chaco. Trabajo en publicación.
- Ontiveros S., Manrique S., Franco J., Díaz R., Barranco N. (2015). Biomasa y Stock de Carbono en la Reserva de Campo Alegre, La Caldera, Provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 19, pp.06.01-06.12, 2015. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES2015.
- Potter C., Davidson E., Verchot L. (1996) Estimation of global biogeochemical controls and seasonality in soil methane consumption, *Chemosphere*, Vol.32, 11, pp.2219-2246, ISSN 0045-6535, [http://dx.doi.org/10.1016/0045-6535\(96\)00119-1](http://dx.doi.org/10.1016/0045-6535(96)00119-1).
- Priano M., Fuse´ V., Gere J., Berkovic A., Williams K., et al. (2013). Tree plantations on a grassland region: effects on methane uptake by soils. *Agroforest Syst.* (2014). 88:187–191 DOI 10.1007/s10457-013-9661-6. Pp 1-5.
- Price S., Sherlock R., Kelliher F., McSeveny T., Tate K., et al. (2004). Pristine New Zealand forest soil is a strong methane sink. *Glob Change Biol* 10:16–26.
- Pumpanem J. et al. (2004). Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Metereology*, 123 (3), 159-176.
- Ridgwell A., Marshall S., Gregson K. (1999) Consumption of atmospheric methane by soils: A process-based model. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.13, 1, pp 59-70. DOI: 10.1029/1998GB900004.
- Smith K., Dobbie K., Ball B., Bakken L., Sitaula B., et al (2000). Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology* 6, 791–803.
- Smith K; Ball, T.; Conen F.; Dobbie K.; Massheder J. et al. (2003) Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, Vol.54, pp.779-791.

- Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M. Editors. (2005) Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Series: Environmental Science and Engineering. Subseries: Environmental Science, XXVIII, 732 p. 200. ISBN 978-3-540-26643-3.
- USDA. (2004). Soil survey laboratory methods manual. Report no. 42. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, Washington. P 213–626.
- Walckley A., Black A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soli Ssci.*37:29-38.

ABSTRACT: Methane (CH₄) fluxes were quantified in gallery forest (BG) and Forest of Filo (BF) soils (soil-atmosphere interface), at different epoch of recordings (2016-2017). Applying the static camera method. The mean rate of sequestration of CH₄ in BG (-11.87 ng. m⁻² s⁻¹) was 6.5% higher than that of BF (-11.10 ng. m⁻² s⁻¹), although these differences were not statistically significant ($H=1,31; p=0, 2515$). The maximum rate in BG was -13.35 ng. m⁻² s⁻¹ and in BF of -12.01 ng. m⁻² s⁻¹. The CH₄ sequestration obtained between the different times were statistically significant in BG ($H=18, 31; p=0, 0001$) and BF ($H=13, 24; p=0,0013$), presenting the BG a marked seasonality, according to previous reports. The correlation between the rate of CH₄ sequestration and environmental parameters was analyzed. This study contributes to the knowledge of the CH₄ fluxes in NOA forest soils, which is very useful in future national inventories of greenhouse gases.

Keywords: native forest, climate change, static chambers, forest soils, methane sequestration.

SIMULACIÓN MEDIANTE MODELOS ANALÍTICOS DE ESTELA EN PARQUES EÓLICOS Y VALIDACIÓN CON MEDICIONES DEL PARQUE EÓLICO RAWSON

Florencia Lazzari¹ y Alejandro Otero².

Centro de Simulación Computacional para Aplicaciones Tecnológicas (CSC) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Godoy Cruz 2390 C.P. C1425FQA – Capital Federal
Tel. 011 4899-5500 e-mail: flor.lazzari@hotmail.com

Recibido 17/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: Cuando el aire fluye a través de una turbina eólica y se extrae energía del flujo, este se desacelera (región de estela). En parques eólicos, la reducción de la velocidad del viento en la estela genera una pérdida en la producción de las turbinas aguas abajo. Una parte importante de los pronósticos de potencia eólica es evaluar los efectos de estela. Existen distintos métodos para simular este efecto; los modelos analíticos son los utilizados en pronósticos operativos de potencia por ser económicos en cuanto a recursos computacionales. El objetivo de este trabajo fue implementar un modelo analítico, distintos métodos de superposición de estelas y comparar los resultados con simulaciones CFD y mediciones del parque operativo Rawson. Se encontró que el modelo analítico gaussiano reproduce correctamente el déficit en la estela y que el método de superposición cuadrático es el que mejor aproxima las mediciones cuando se modela un parque.

Palabras clave: energía eólica, modelos analíticos de estelas, eficiencia del parque, validación de modelos.

INTRODUCCION

La generación de energía eólica no tiene control sobre la inyección de energía hacia la red, ya que depende de las condiciones meteorológicas instantáneas. Sin embargo, con ayuda de pronósticos de producción de energía se pueden prever posibles variaciones en la generación, posibilitando una mejor gestión de la red. A medida que el aire fluye a través de una turbina eólica y se extrae energía de él, este se desacelera y la intensidad de turbulencia aumenta, a esta región aguas abajo de la turbina se la llama estela.

En parques eólicos, las turbinas se perturban a través de sus estelas: la reducción en la velocidad del viento afecta el rendimiento de las turbinas aguas abajo haciendo que las estelas sean responsables de pérdidas en la producción de energía. Por lo tanto, una parte importante de los pronósticos de potencia eólica es el cálculo de los efectos de estela.

Existen distintos enfoques para estudiar el flujo atmosférico atravesando un parque eólico. Por un lado, se pueden utilizar técnicas de fluido-dinámica computacional (CFD) (Sumner et al, 2010; Hewitt et al., 2017). Sin embargo, estas técnicas, si bien son de alta precisión, tienen un costo computacional elevado, por lo que en la práctica son imposibles de implementar en pronósticos operativos o en modelos de optimización para el planeamiento de futuros proyectos o el control de los mismos. Estas opciones solamente resultan viables para obtener soluciones pre-computadas en modo no operativo.

¹ Estudiante, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

² Investigador, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería CSC-CONICET

MODELOS ANALÍTICOS

La alternativa para ahorrar recursos computacionales es utilizar modelos analíticos, en los cuales la aerodinámica en el entorno de las turbinas eólicas es descripta a partir de leyes de conservación, sin la necesidad de resolver las ecuaciones diferenciales de la fluido-dinámica. Se han propuesto diversos modelos de este tipo, que se diferencian en las hipótesis planteadas para la representación del rotor. Estas simplificaciones implican una pérdida de precisión pero una importante reducción del costo computacional. Estos modelos en general tienen validez en lo que se denomina estela lejana de la turbina que la produce y se pueden utilizar para generar las condiciones de entrada a turbinas aguas abajo. Se han propuesto diferentes modelos analíticos de estelas a lo largo del tiempo (Jensen 1983; Frandsen 2006). Lo que hacen los distintos modelos es describir el déficit de viento generado por la turbina. El déficit normalizado viene dado por la diferencia entre el viento aguas arriba u y el viento en la estela (en inglés *wake*) u_w , dividido por el viento aguas arriba:

$$\frac{\Delta u}{u_\infty} = \frac{u_\infty - u_w}{u_\infty} \quad (1)$$

Dentro de los modelos publicados más recientemente encontramos el de *Bastankhah y Porté-Agel* (2014). Para derivar el modelo los autores utilizaron la ley de conservación de masa, la ley de conservación de momento lineal y agregaron la hipótesis que el déficit posea una forma gaussiana (lo cual es evidente tanto en mediciones de túnel de viento como en simulaciones computacionales más complejas). A continuación se presenta la ecuación que modela la estela gaussiana, para la cual se utilizaron las constantes k y ϵ , coeficientes de expansión de estela y offset respectivamente. A partir de aquí siempre se utilizará un eje de coordenadas en el cual el eje x está determinado por la dirección del flujo base, y es el eje perpendicular a la dirección del viento centrado en el disco de la turbina y z es la altura desde el suelo. Además, d es el diámetro del rotor, C_T es el coeficiente de empuje de la turbina y z_h es la altura de la góndola. Utilizando la nomenclatura mencionada el modelo analítico gaussiano queda de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta u}{u_\infty} = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{C_T}{8(kx/d + \epsilon)^2}} \right) \exp \left\{ -\frac{1}{2(kx/d + \epsilon)^2} \left(\left(\frac{z - z_h}{d} \right)^2 + \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right) \right\} \quad (2)$$

Los valores utilizados para k y ϵ fueron obtenidos del ajuste gaussiano de los resultados obtenidos con un software de CFD simulando el sistema compuesto por una única turbina.

MÉTODOS DE SUPERPOSICIÓN

Para el caso en el que la configuración consista de un conjunto de turbinas, como en los parques eólicos, el cálculo se vuelve más complejo ya que existe una interacción entre las estelas de distintas turbinas. Se representará la superposición de las estelas utilizando tres métodos distintos en los que la condición del flujo aguas abajo correspondiente a la turbina $n+1$ se obtiene de la superposición de los n déficits individuales aguas arriba evaluados en la ubicación aguas abajo de la turbina $n+1$. Los métodos más utilizados son: el lineal, el cuadrático y el dominante (Kester et al., 2016). En el lineal, como su nombre lo indica, la superposición de los déficits es lineal. Tomando j como el contador sobre las turbinas, queda la siguiente expresión para la superposición lineal

$$\Delta u_{n+1} = \sum_{j=1}^n (\Delta u_j|_{(n+1)}) \quad (3)$$

En el caso de la superposición cuadrática de déficits, el déficit total aguas abajo se obtiene según

$$\Delta u_{n+1} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\Delta u_j|_{(n+1)})^2} \quad (4)$$

Por último, en el método dominante, en lugar de hacer una suma de déficits, lo que se hace es utilizar únicamente el valor correspondiente al déficit máximo, como se observa en la siguiente expresión

$$\Delta u_{n+1} = \text{Max} (\Delta u_j|_{(n+1)}, 0 \leq j \leq n) \quad (5)$$

Para simular un parque eólico se implementó satisfactoriamente un código que itera sobre las turbinas de forma ordenada, siendo la primera turbina la que está aguas arriba de todo el parque (de modo que la numeración de las turbinas varía dependiendo de la dirección del viento). El ciclo itera sobre todas las turbinas y lo que hace es establecer el modo de funcionamiento (caracterizado por el C_T) y la potencia generada por cada una. En caso de que el flujo entrante a una turbina estuviera afectado por la estela de alguna del resto de las turbinas, entonces el código calcula, utilizando el modelo de déficit y el método de superposición elegido, la perturbación generada al flujo base.

EXPERIMENTACIÓN Y VALIDACIÓN NUMÉRICA

Para contrastar diferentes situaciones de estela con datos reales se utilizaron mediciones del parque eólico Rawson. El parque eólico Rawson está emplazado sobre tierra a pocos kilómetros de la capital de Chubut. Esta zona es caracterizada por terreno llano, con un viento medio de 8 m/s. Los vientos predominantes tienen componente oeste, con una mayor frecuencia en la dirección 270° . El parque está compuesto por 43 turbinas Vestas V90, distribuidas en 4 filas en dirección SO y un mástil meteorológico localizado en la esquina NO. Todas las turbinas son de 1.8 MW, con una altura de góndola de 80 m y un diámetro del rotor de 90 m. El fabricante de las turbinas proporciona, como información básica sobre el rendimiento, curvas para C_T y potencia en función C_T , C_P y potencia en función de u . Con respecto a la distribución promedio dentro del parque, las turbinas se encuentran separadas $4d$ dentro de la fila y $12d$ entre filas. Esto da al parque una dimensión total de 4 km x 4 km.

Déficit de Potencia en Turbinas Alineadas

Para el estudio de comparación de los resultados numéricos del modelo analítico con los datos medidos del parque Rawson se seleccionaron las cuatro turbinas más cercanas al mástil meteorológico como se muestra en la figura 1. Se realizaron tres pruebas en base a este conjunto de turbinas para una velocidad de referencia de 8 m/s ya que este valor está dentro del rango de trabajo óptimo de las turbinas.

Las simulaciones se realizaron con esta velocidad de entrada a la altura de la góndola, utilizando un perfil de viento logarítmico para representar a la capa límite atmosférica. El parámetro estudiado fue el cociente entre la potencia generada por la turbina aguas abajo (sotavento), es decir la afectada por el efecto de estela y la turbina a aguas arriba (barlovento), es decir la que recibe el flujo limpio.

Se compararán los resultados del modelo analítico con los resultados obtenidos con un software de CFD (OpenFOAM) y con mediciones. El parámetro que se analizó fue la eficiencia energética, es decir, la relación entre la potencia generada por la turbina aguas abajo y la potencia generada por la turbina aguas arriba. Dado que el código del modelo analítico no es determinista, se hicieron 100 corridas para cada configuración y se presentan los resultados con sus márgenes de error bajo el área sombreada de los gráficos.

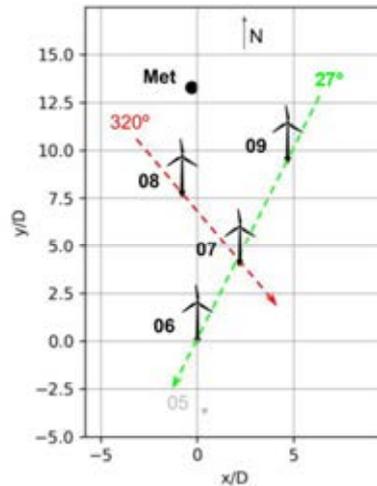


Figura 1: Plano de las cuatro turbinas más cercanas al mástil meteorológico. Se marcan las direcciones del viento para las cuales la recta que une las turbinas 8 y 7 es paralela a la dirección del flujo (rojo) y lo análogo para las 9 y 6 (verde).

En la primera prueba, se analiza la pérdida de potencia de la turbina 7 cuando funciona dentro de la estela de la turbina 8. La recta que une estas dos turbinas es paralela a la dirección del flujo cuando la dirección del viento es 320° (línea roja en la figura 1). La distancia entre las turbinas es $4,7d$. El fenómeno de interferencia se analiza para un rango de direcciones de 60° centrado en la dirección de referencia 320° .

En la figura 2 se presentan los resultados en términos del ángulo relativo al ángulo de referencia (320°). Es decir, en el gráfico la dirección 0° equivale a la situación en la que la recta que une ambas turbinas es paralela a la dirección del viento (320°). La magnitud estudiada es la relación entre la potencia generada por las turbinas 7 y 8 para el rango de direcciones de viento mencionado. La turbina 8 es la de barlovento (aguas arriba) y la 7 es la de sotavento (aguas abajo).

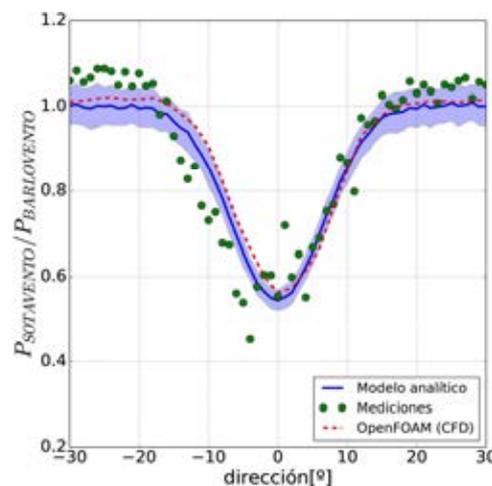


Figura 2: Relación entre la potencia generada por las turbinas 7 y 8 para distintas direcciones de viento. La dirección 0° equivale a la situación en la que la recta que une ambas turbinas es paralela a la dirección del viento (320°). La turbina 8 es la de barlovento (aguas arriba) y la 7 es la de sotavento (aguas abajo).

Del gráfico se concluye que, para el caso en que una turbina se encuentra dentro del déficit de otra, el modelo analítico se solapa con las soluciones de CFD (tanto en el ancho del déficit de potencia como en la dirección y la magnitud del mínimo). Es importante destacar que, al comparar los bordes de la estela, el modelo analítico se basa en la hipótesis de que el déficit tiende a cero mientras que tanto las simulaciones de CFD como las mediciones muestran un déficit negativo, es decir, una aceleración del viento que los modelos analíticos no son capaces de simular. Sin embargo, la consideración de dicha

aceleración del flujo en el CFD no es lo suficientemente apreciable como sí lo es en las mediciones. De esta forma, el error del modelo analítico se ubica principalmente en el borde de la estela. A partir de estos resultados se puede verificar que el modelo analítico de estela gaussiana aproxima muy bien el efecto que genera la turbina eólica sobre el flujo, prediciendo adecuadamente la magnitud del déficit y el ancho de la estela.

Para la segunda prueba se repitió el mismo estudio utilizando las turbinas 9 (barlovento) y 7 (sotavento), la distancia entre ellas es de $5,7d$ y la recta que une ambas turbinas es paralela a la dirección del flujo cuando la dirección del viento es 25° (notar que la línea verde en la figura 1 une las turbinas 9 y 6 que no son las que se estudiarán en este caso). Nuevamente se estudió un rango de direcciones de 60° centrado en la dirección de referencia y los resultados se presentan en términos del ángulo relativo al de referencia. Se presentan los resultados en la figura 3. Las conclusiones son las mismas que para el caso anterior con lo cual se puede resumir que para el análisis de dos turbinas alineadas los resultados de los modelos analíticos fueron comparables con los obtenidos mediante CFD, con mucho menor esfuerzo computacional.

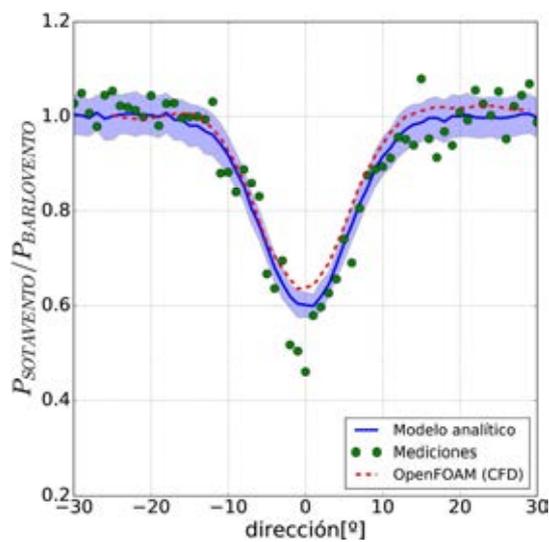


Figura 3: Relación entre la potencia generada por las turbinas 7 y 9 para distintas direcciones de viento. La dirección 0° equivale a la situación en la que la recta que une ambas turbinas es paralela a la dirección del viento (25°). La turbina 9 es la de barlovento (aguas arriba) y la 7 es la de sotavento (aguas abajo).

Para el último experimento se utilizaron las turbinas 9 (barlovento) y 6 (sotavento). Cuando el viento proviene de la dirección 27° , ambas quedan alineadas con el flujo. Sin embargo, como se observa en el esquema de la figura 1, esta configuración difiere de las anteriores dado que, cuando el viento proviene de dicha dirección la turbina 7 perturba el flujo entrante a la turbina 6. Si bien en el esquema no es perceptible, la turbina 7 se encuentra levemente desplazada (hay 2° entre el vector que une a la turbina 7 con la 9 y el que une a la 6 con la 9). Dado que en este caso el flujo de entrada que llega a la turbina de sotavento se ve afectado por dos estelas en lugar de una (como en los estudios anteriores), se evaluaron los distintos métodos de superposición. En la figura 4 se presentan los resultados.

Cuando se comparan las simulaciones de CFD y las mediciones con las simulaciones del modelo analítico se encuentran grandes diferencias al variar los métodos de superposición. Se ve que no hay un método que ajuste muy bien los datos. El problema surge ya que nuevamente se observa la aceleración en el contorno de la estela que no es tenida en cuenta en el modelo analítico. Al comparar el modelo analítico con los resultados del CFD, se observa que el método que mejor aproxima la intensidad del déficit en eficiencia es el cuadrático, el lineal sobrestima la pérdida de energía y el dominante la subestima. Además, cuando se compara la dirección del valle, el método cuadrático y dominante muestran al máximo déficit levemente desplazado hacia la dirección de la turbina 7 (2°), lo cual también se observa en el CFD. Por otro lado, en el método dominante el valle también está

desplazado, pero el corrimiento es mucho mayor al observado en el CFD. Al comparar con las mediciones, el CFD subestima el déficit, y el único método de superposición que aproxima bien la intensidad es el lineal.

Para cada uno de los gráficos presentados en las figuras 2,3 y 4 se calculó el coeficiente de bondad de ajuste. En la tabla 1 se presentan los coeficientes de bondad de ajuste calculados para el modelo analítico respecto a las mediciones y por otro lado para el modelo analítico respecto al CFD.

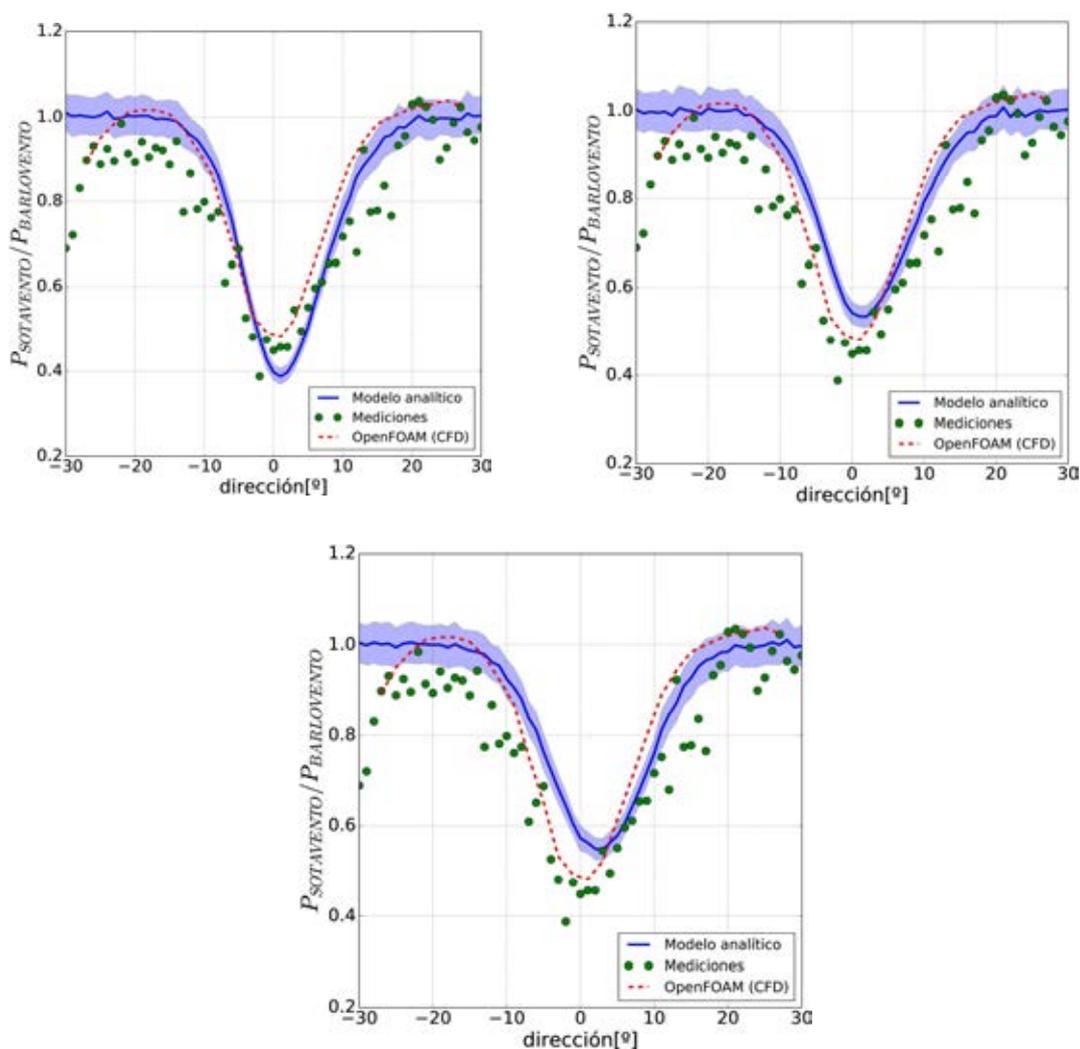


Figura 4: Relación entre la potencia generada por las turbinas 6 y 9 para distintas direcciones de viento. La dirección 0° equivale a la situación en la que la recta que une ambas turbinas es paralela a la dirección del viento (27°). La turbina 9 es la de barlovento (aguas arriba) y la 6 es la de sotavento (aguas abajo). La turbina 7 se encuentra entre ambas, con un corrimiento de 2° respecto al vector que las une. Se utilizaron los distintos métodos de superposición: lineal (arriba, izquierda), cuadrático (arriba, derecha) y dominante (abajo).

	Coeficiente de Bondad de Ajuste de modelo analítico respecto de:	
	Mediciones	CFD
Turbina 7 y 8	0,96	0,99
Turbina 7 y 9	0,97	0,99
Turbina 6 y 9	Lineal 0,93 - Cuadrático 0,89 – Dominante 0,86	Lineal 0,97 - Cuadrático 0,97 – Dominante 0,95

Tabla 1: Coeficientes de bondad de ajuste.

De la tabla 1 se puede concluir, en primer lugar, que todos los modelos analíticos reproducen correctamente el fenómeno estudiado ya que en todos los casos el coeficiente de bondad es cercano a

1. Al estudiar los coeficientes en detalle se observa que en el caso en que una turbina se ve perturbada únicamente por otra (primeros dos casos), el modelo analítico se aproxima muy bien tanto a la simulación CFD como a las mediciones. Por otro lado, al estudiar los distintos métodos de superposición, tanto el lineal como el cuadrático aproximan correctamente a la simulación CFD y en cuanto a las mediciones, el lineal muestra un mejor desempeño.

CÁLCULO DE POTENCIA TOTAL DEL PARQUE EÓLICO

A continuación se hicieron corridas en las que se incluyeron todas las turbinas del parque eólico Rawson con la distribución del parque real y se las compararon con mediciones. Tanto los resultados de las simulaciones como las mediciones describen una condición de viento de dirección 270° y 8 m/s ya que esta es la situación más frecuente del parque y en la que el potencial del parque es explotado al máximo.

Al utilizar el código de modelos analíticos, se corrió un perfil de flujo de entrada logarítmico utilizando el modelo de déficit gaussiano y distintos métodos de superposición. Para la corrida de CFD el dominio alcanzó una cantidad de aproximadamente 12 millones de puntos de grilla, lo que exige un cálculo paralelo para el cual se utilizó el clúster TUPAC alojado en el CSC-CONICET (Vinazza et al., 2017).

El terreno del parque es casi llano en la extensión del dominio, a excepción de las turbinas del sur de la primera y cuarta filas, donde existen diferencias de hasta 40 m en comparación con el resto de las turbinas. Los datos de la topografía del terreno fueron contemplados en el mallado del CFD. En el modelo analítico únicamente se consideró la diferencia de altura de las góndolas como aproximación al modelado del terreno.

Dado que el objetivo de este trabajo se enmarca en el efecto que tiene la estela sobre la estimación de potencia de un parque eólico, los gráficos que se muestran a continuación reflejan la potencia generada por cada turbina bajo la condición meteorológica mencionada. Sin embargo, al buscar comprender el efecto de estela sobre la potencia generada, el valor de potencia neto no es relevante. La magnitud que es de mayor importancia es la potencia relativa a la potencia de referencia, donde la potencia de referencia es aquella que la turbina debería generar si no estuviera bajo el efecto de estela de otra turbina. Para el cálculo de la potencia de referencia se utiliza la velocidad que informa el mástil meteorológico (para este caso 8 m/s) y el C_p brindado por el fabricante para este viento de referencia. Con lo cual, si la potencia relativa de una turbina es 1 entonces se concluye que la turbina no se encuentra bajo el efecto de estela y, si es menor a 1, sí se encuentra bajo el efecto de estela.

Además, existen casos en los que la potencia relativa es mayor a 1. Las razones por las cuales podría suceder esto son variadas. Una de las más comunes ocurre cuando la turbina se encuentra a mayor altura que el anemómetro del mástil meteorológico (por la topografía del terreno) y, como la velocidad del flujo crece con la altura, la generación de potencia es mayor que la establecida como referencia. Otra razón es que la turbina se encuentre en el borde de la estela de otra turbina donde, como se remarcó anteriormente, se observa de las mediciones que el flujo se acelera. También ocurre que el flujo se acelera por la topografía del terreno. Finalmente, entre estas causas se encuentra la posibilidad de que el anemómetro sea el que esté afectado por la estela del parque haciendo que la velocidad de referencia utilizada sea menor que la del flujo entrante real.

Las figuras presentadas a continuación son una representación en un plano de la ubicación de las turbinas; se simboliza la potencia relativa con una escala de colores. Si la turbina genera la potencia nominal para esa intensidad de viento esto se representa en color blanco, si genera menos que la potencia nominal entonces está bajo el efecto de estela y se lo representa en color azul, por último, si la turbina genera más de lo nominal por estar en una zona donde el flujo se acelera se lo representa en rojo. En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos con el código del modelo analítico utilizando distintos métodos de superposición. En la figura 6 se encuentran los resultados de la corrida de CFD y en la figura 7 la información proveniente de las mediciones.

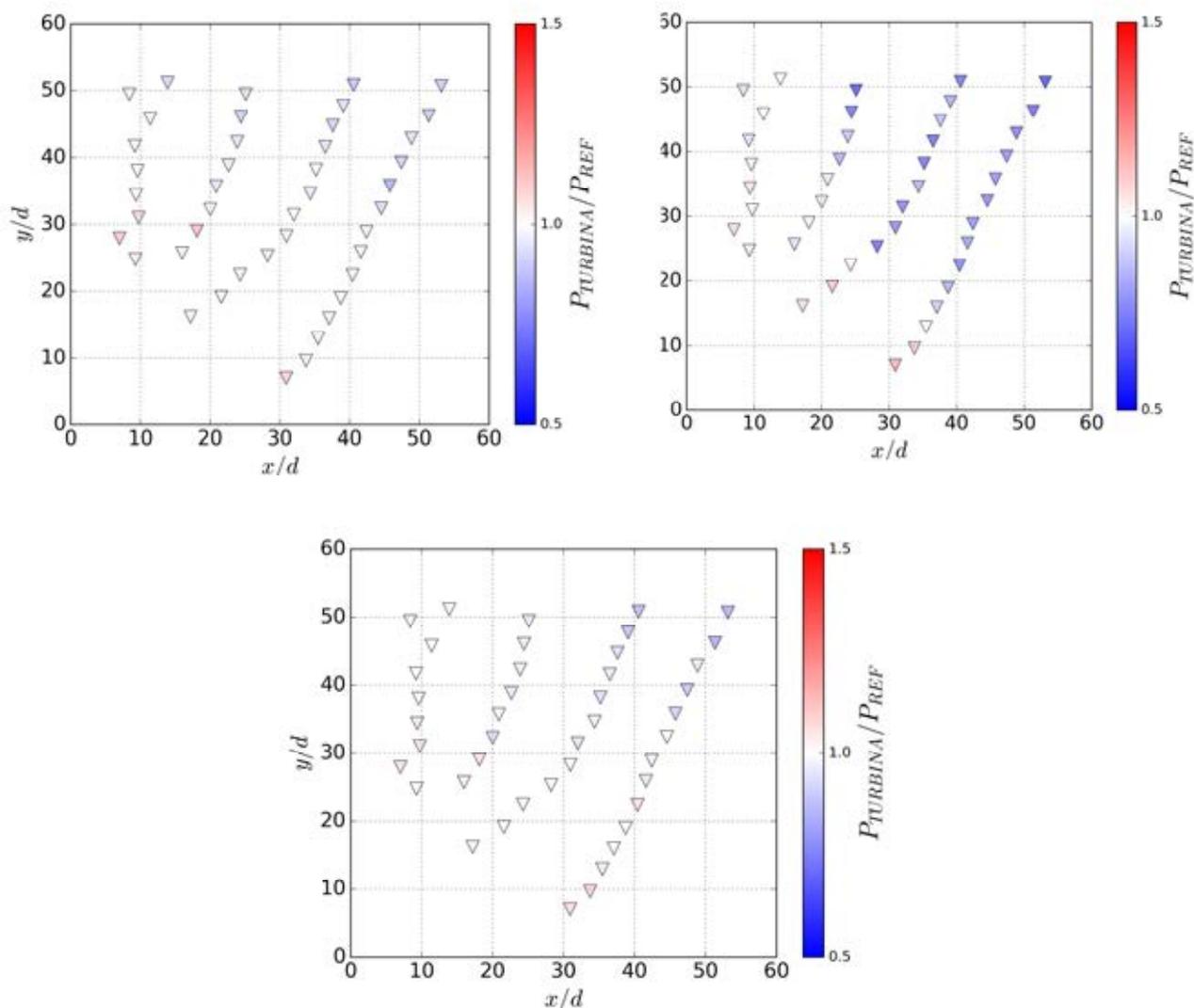


Figura 5: Generación de potencia relativa al valor de potencia de referencia utilizando el modelo analítico con distintos métodos de superposición para la configuración del parque eólico Rawson con viento de dirección 270° e intensidad de 8 m/s . Los métodos de superposición fueron: lineal (arriba, izquierda), cuadrático (arriba, derecha) y dominante (abajo).

Con el fin de comparar los métodos de superposición se presentarán además los valores máximos y mínimos de potencia relativa para cada caso. La potencia relativa en el estudio con el método lineal varió entre 1,10 y 0,87, para el método cuadrático fue entre 1,14 y 0,65 y en el método dominante entre 1,08 y 0,89.

A partir de estos resultados se encuentra que el máximo de potencia relativa es similar (del orden de 1,1) en todos los casos, lo cual era de esperarse ya que el cambio en la superposición de estelas solo se hará evidente en las turbinas que se encuentren bajo el efecto de más de una estela y estas no son las que aportan al máximo de potencia relativa. Este hecho se puede apreciar en los gráficos al observar que en ninguno se encuentra alguna turbina con rojo intenso. Si se entiende al parque como conformado por 4 filas en dirección NO-SO, las turbinas que más generan (las más rojizas) son, en los tres casos, las últimas de cada fila. Esto sucede ya que, las últimas turbinas de las filas se encuentran en una zona donde el terreno está elevado con respecto a la zona del mástil meteorológico. Más aún, de todas las posibilidades que se propusieron para que la potencia relativa tome valores mayores a 1, como el modelo analítico no contempla aceleraciones en el flujo causadas por la topografía del terreno o el borde de las estelas, el único factor que influye es la altura de la góndola respecto del mástil.

Al estudiar el mínimo de potencia relativa se observa que los mínimos obtenidos para los métodos de superposición lineal y dominante son significativamente mayores al correspondiente para el método cuadrático. Esto se hace evidente cuando se comparan los gráficos. En las figuras correspondientes al método lineal y el dominante no se perciben colores azules intensos mientras que en la del método cuadrático se observa un cúmulo de turbinas más afectadas por la estela en el sector NE.

En la figura 6 se presentan los resultados de la simulación de CFD. Es fácil notar, de la comparación con los gráficos de modelos analíticos, que si bien la distribución de las zonas de exceso (SO) y déficit (NE) de potencia se asemejan, las turbinas que generan menos que el valor nominal lo hacen por debajo de los valores encontrados previamente (el azul es más intenso que en los gráficos anteriores). Esto se corrobora al analizar los valores máximos y mínimos que son 1,14 y 0,51, el máximo es comparable al del modelo analítico pero el mínimo es significativamente menor al de los resultados de los modelos analíticos.

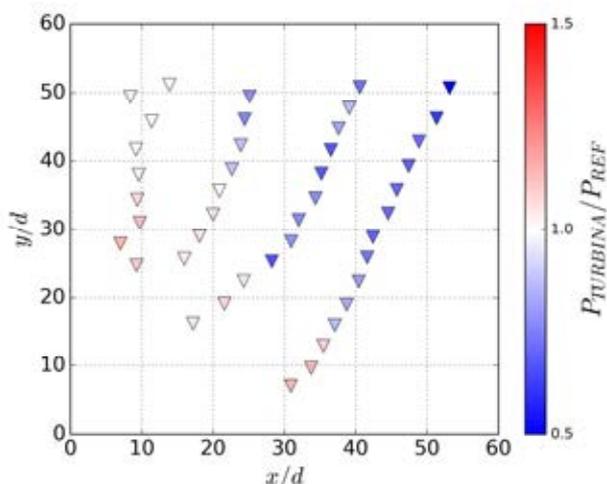


Figura 6: Generación de potencia relativa simulada con OpenFOAM para la configuración del parque eólico Rawson con viento de dirección 270° e intensidad de 8 m/s.

De aquí se desprende que el crecimiento de la estela utilizado o los métodos de superposición no logran replicar los efectos de estela del CFD, obteniendo por resultado un valor que sobrestima la potencia total generada del parque. Por otro lado, está claro que los efectos de la topografía del terreno no pueden modelarse de forma completa solamente considerando turbinas de distintas alturas. Las aceleraciones y desaceleraciones provenientes de los cambios en la inclinación del suelo no son consideradas en el modelo analítico mientras que sí son tenidas en cuenta en el CFD. Además, se sabe que este es el principal factor de aceleración del flujo, con lo cual, dado que el máximo de potencia relativa del modelo analítico es comparable con el del CFD, se concluye que el considerar la altura de las góndolas aproxima correctamente al modelado del terreno del CFD.

Para finalizar la comparación del modelo analítico contra el CFD al simular un parque eólico completo, es importante destacar el tiempo de cómputo. Mientras la corrida de CFD necesitó 1 hora corriendo en 256 procesadores, el modelo analítico corrió en 8 segundos. De esto se concluye que la diferencia en el tiempo de cómputo es realmente muy grande cuando se trata del modelado de un parque completo y esto es lo que hace que los modelos analíticos sigan siendo los únicos utilizados para pronósticos operativos y estimación de potencia para optimización de la distribución de turbinas, ambos casos donde hay fuertes restricciones de tiempo de computo.

CONCLUSIONES

Con el objeto de desarrollar mejoras en los pronósticos de producción de energía eléctrica, se logró implementar satisfactoriamente un código integrado que permite calcular la potencia generada por cada turbina utilizando un modelo analítico de estela y distintos métodos de superposición. Al reproducir las condiciones del parque eólico Rawson se observó que, para el caso en que una turbina

se encuentra dentro del déficit de otra, el modelo analítico gaussiano se solapa con las soluciones de CFD y las mediciones (tanto en el ancho del déficit de potencia como en la dirección y la magnitud del mínimo). Para el caso en que una turbina se encuentra dentro de la estela de dos turbinas levemente desalineadas se observa que tanto el método de superposición lineal como el cuadrático son los que tienen mejor desempeño. Además, se observa en términos generales que una posible mejora a futuro sería intentar replicar el efecto producido en los bordes de la estela de aceleración del viento causada por la turbulencia. Finalmente, al comparar los resultados de modelos analíticos con las simulaciones de CFD del parque eólico Rawson completo, se concluye que la simulación analítica con método de superposición cuadrático reproduce correctamente el efecto de estela en el que la reducción de la velocidad del viento afecta el rendimiento de las turbinas aguas abajo. Además, se observó que el modelo analítico, si bien no tienen la capacidad de reproducir las aceleraciones del flujo producto de la topografía, logra percibir la producción en exceso de una turbina provocada al considerar la altura de las góndolas.

REFERENCIAS

- Sumner J., Sibuet Watters C. y Masson C. (2010). CFD in wind energy: the virtual, multiscale wind tunnel. *Energies* 3.5, 989-1013.
- Hewitt S., Margetts L. y Revell A. (2017). Building a Digital Wind Farm. *Archives of Computational Methods in Engineering*.
- Jensen N. O. (1983). A note on wind generator interaction.
- Frandsen S. et al. (2006). Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology* 9.1□2, 39-53.
- Bastankhah M. y Porté-Agel F.. (2014). A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable Energy* 70, 116-123.
- Kester G., et al. (2016). Limitations to the validity of single wake superposition in wind farm yield assessment. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. 749, 1.
- Vinazza D., Otero A., Soba A. y Mocsos E. (2017). Initial Experiences from TUPAC Supercomputer. *Latin American High Performance Computing Conference*. 38–52. Springer

ABSTRACT

When the air flows through a wind turbine and energy is extracted from the flow, the air decelerates (wake region). In wind farms, the reduction of the wind speed in the wake generates a loss in the production of the turbines downstream. An important part of wind power forecasts is to evaluate wake effects. There are different methods to simulate this effect; analytical models are those used in operational power forecasts because they are economical in terms of computational resources. The aim of this work was to implement an analytical model, different methods of overlapping wakes and compare the results with CFD simulations and measurements of the Rawson operating wind farm. It was found that the gaussian analytical model correctly reproduces the deficit in the wake and that the quadratic superposition method is the one that best approximates the measurements when a wind farm is modeled.

Keywords: wind energy, analytical wake models, wind farm efficiency, model validations.

COGENERACIÓN EN CHILE: CAPACIDADES, DESARROLLO Y PERSPECTIVAS

Axel Poque Gonzalez¹, Yunesky Masip Macía², Javier Valdes³, Luis Ramirez Camargo³

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quilpué, Chile

Institute for Applied Informatics, Technische Hochschule Deggendorf, Freyung, Germany

Grafenauer Str. 22 94078 Freyung, Germany

Tel. +49 (0)8551 91764-28. E-mail: luis.ramirez-camargo@th-deg.de

Recibido 07/08/18, aceptado 11/09/18

RESUMEN: En Chile, el proyecto de cogeneración más antiguo data de 1930 y operó hasta el año 1997. Sin embargo, pese a que la tecnología lleva introducida largo tiempo, pocos son los estudios que han analizado el potencial de CHP y su evolución. Un primer paso para el estudio del potencial del país es la creación de un catastro que incluya la capacidad instalada. El interés de este ejercicio radica en el potencial de integración de mayores cantidades de CHP en el sistema eléctrico con el objetivo de hacer frente a la intermitencia de fuentes de energía no convencionales. Además, las plantas CHP pueden ayudar a alcanzar los objetivos de eficiencia energética gracias a la posibilidad de los generadores de volcar a la red tanto la electricidad como calor no consumido en los procesos productivos. Sin embargo, para que esto ocurra es necesario el desarrollo de un marco regulatorio acorde a las capacidades y características de las plantas de CHP. El objetivo de este artículo es precisamente identificar las características de las instalaciones en industrias específicas, así como su evolución, con el objetivo de extrapolar los datos al resto de la economía y obtener un potencial de CHP para el país. Para ello, se han hecho consultas de catastros anteriores, así como entrevistas con empresas para conocer el estado actual del parque de plantas de CHP en el país.

Palabras clave: cogeneración, eficiencia energética, flexibilidad del sistema eléctrico

1. INTRODUCCIÓN

En 2017, el 57.4% de la producción de electricidad en Chile se basa en combustibles fósiles, principalmente carbón importado. Esto no solo genera grandes cantidades de CO₂ que contribuyen a la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y a la contaminación local del aire y el suelo, sino que también, hace que Chile dependa de la importación de fuentes primarias de energía (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2018). Debido a la dependencia de la economía chilena a los combustibles fósiles, en los últimos años se han dado diversos avances en políticas públicas y el marco regulatorio del país. Como consecuencia de estos esfuerzos, el año 2017 el 16% de la generación eléctrica correspondía a Energías Renovables No Convencionales (ERNC). El empeño de Chile por utilizar mejor sus recursos naturales como, el sol, el viento, la energía hidroeléctrica y la biomasa tiene como principal objetivo diversificar la matriz energética y proveer a la economía con un suministro energético sostenible de electricidad y calor. Para ello, junto a las ERNC, la Cogeneración (Combined Heat and Power-CHP por sus siglas en inglés) ha sido uno de los pilares de la revolución energética del país, basada en la búsqueda de una mayor eficiencia energética, la descarbonización y flexibilidad del sistema eléctrico.

El uso y potencial de la CHP para su aplicación desde la micro hasta la gran escala, se ha investigado

¹ Estudiante Investigador, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

² Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

³ Senior Scientist, Institute for Applied Informatics, Technische Hochschule Deggendorf

en una amplia gama de industrias, sectores comercial y residencial y adoptado en diversos países. En diferentes estudios se puede encontrar una descripción general de las tecnologías de CHP que se utilizan acorde a los tipos de industrias (Varbanov y Klemeš, 2011). En el contexto chileno, se ha evaluado el potencial de CHP para el sector Industrial y Minero (I&M), hospitales públicos y también para otros sectores económicos (Universidad de Chile, 2010; Universidad de Chile, 2013; GIZ, 2014). En estos estudios también se ha detectado los principales desafíos que enfrenta la CHP, los cuales incluyen la existencia de importantes barreras para su implantación, tales como, los altos montos de inversión en estas tecnologías y el bajo precio de la energía eléctrica vendida a la red, lo cual, alarga los tiempos de recuperación del capital. Esto, acompañado de un mercado que desconoce en gran medida esta tecnología, sus beneficios y formas de mantención, incluyendo a los actores que entregan los aportes financieros para su desarrollo.

Atendiendo a lo descrito, el objetivo de este trabajo consiste en generar un catastro de las plantas de CHP existentes en Chile, a partir del cual, se determine el potencial de CHP para el país, considerando los sectores I&M, el sector comercial y público. El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 2 analiza los esfuerzos anteriores para desarrollar catastros de las plantas existentes en Chile. La sección 3 describe la metodología mediante la cual se determinaron las plantas de CHP existentes en operación y con aprobación para su construcción, a partir de las fuentes de información públicas, empresas y agencias ligadas al ámbito de la energía, obteniendo variables, tales como, la capacidad instalada eléctrica y térmica, energía eléctrica inyectada a la red, portador energético empleado para cogenerar, localización geográfica, año de inicio de operación y el tipo de tecnología empleada (turbina de gas o vapor y motor de combustión interna). En la sección 4 de resultados se analiza el desarrollo y evolución de la CHP en Chile a lo largo del tiempo determinando el potencial de CHP disponible en el país, tomando como base la demanda energética disponible para el sector industrial, minero, comercial y público. Finalmente, las conclusiones se recogen en la sección 5 del trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

En Chile, el proyecto de CHP más antiguo data de 1930, una turbina de vapor de 6 MWe con caldera a carbón; operó hasta el año 1997. Hoy, el proyecto de CHP más antiguo en funcionamiento es del año 1953, y su potencia instalada es de 2.8 MWe y 16.8 MWt. A pesar que, con el paso de los años el uso de esta tecnología ha ido en aumento motivado por diferentes factores que se describirán más adelante, el análisis sobre la CHP en el país no ha sido mayormente trabajado, y el estudio más reciente que se encuentra disponible data de 2010, actualizado únicamente en 2013 y 2014. Entre los principales antecedentes respecto de la CHP y su potencial de desarrollo en el país se han encontrado los siguientes estudios:

- “Estudio de los Potenciales para la Cogeneración en los Distintos Sectores Económicos en Chile e Instrumentos para facilitar su Aplicación realizado durante el año 1995 por parte de la Comisión Nacional de Energía (CNE) y la consultora ENERGISA (Universidad de Chile, 2010);
- “Análisis Operacional y Comercial de Proyectos de Cogeneración y Energías Renovables Conectadas a Redes de Sub-Transmisión y Distribución Eléctrica” (Deuman Ingenieros, 2003);
- “Evaluación del Desempeño Operacional y Comercial de Centrales de Cogeneración y Estudio del Potencial de Cogeneración en Chile” (Gamma Ingenieros 2004).
- “Estudio para el Desarrollo de la Cogeneración en Chile” (Universidad de Chile, 2010).

La mayoría de los estudios se han concentrado en el cálculo y estimación del potencial de CHP para Chile. No obstante, en algunos de estos trabajos se ha podido establecer un catastro de las empresas que hasta ese momento habían implementado CHP. En el trabajo realizado por (Deuman Ingenieros, 2003) se mostró un estudio del año 1995, ejecutado por parte de la CNE y la Consultora ENERGISA, donde estimaron el potencial de CHP, identificando cerca de 260 MWe potenciales. En dicho estudio de 1995 se concluyó, además, que el impulso a la CHP en Chile requería de un adecuado soporte técnico y asistencia financiera de parte de proveedores especializados, así como, que la mayor parte de esta cogeneración estimada sería para autogeneración, y con muy poca cantidad de excedentes para la venta.

Posteriormente, un estudio para la CNE, determinó que en diciembre de 1997 se contaba con una capacidad de cogeneración instalada en el país cercana a los 350 MWe. Este segundo estudio actualizó las estimaciones del potencial de cogeneración realizadas en el año 1995, dando como resultado un potencial técnico de cogeneración de 1000 MWe, pero con un potencial económicamente factible de 450 MWe (Deuman Ingenieros, 2003). En este mismo estudio, se muestra el trabajo realizado durante el año 1999 por otros investigadores, quienes estimaron que, para la ciudad de Santiago, la más poblada del país, se tenía un potencial de CHP de 300 MWe. Todo el análisis fue realizado, a partir de los datos de aproximadamente 2500 calderas existentes. El estudio preseleccionó las industrias con mayor número y tamaño de calderas instaladas, con lo cual, se obtuvo un total de 570 calderas. Así, con los datos disponibles de 1997 se llegó a calcular el potencial antes mencionado. Además, se estimó en este tercer estudio que para el año 2002 se alcanzaría un potencial en cogeneración de 400 MWe, bajo el supuesto de utilizar una tasa de crecimiento conservadora del 5.6% para las industrias con potencial cogenerador.

En el trabajo de (Gamma Ingenieros, 2004), también se planteó como objetivo la estimación del potencial de CHP, para así generar la información necesaria y definir un Plan de Acción de la CHP en Chile. Los autores se enfocaron principalmente en la “cogeneración industrial”; este “apellido” de industrial” es mencionado, porque dicho estudio se centró en proyectos de CHP en el sector industrial, aunque en la estimación de potencial de CHP se incluyeron hospitales. A raíz de este trabajo, también se obtuvo un catastro de las empresas ligadas al sector I&M que poseían potencia instalada en base a la tecnología de CHP. Otro de los aportes importantes de este trabajo, es que permitió fundamentar y agregar a la CHP como un tipo de Pequeño Medio de Generación en la Ley Corta I y su reglamento, accediendo por tanto, a los beneficios estipulados para estos proyectos. Muchas de las especificaciones técnicas se obtuvieron del estudio.

Otro de los estudios con gran impacto y fiabilidad en sus resultados es el llevado a cabo por (Universidad de Chile, 2010). En este, de manera similar al estudio del año 2004, se persigue como objetivo principal generar bases fundamentadas para elaborar un plan de acción que incentive la implementación masiva de la CHP en la matriz energética entre los años 2010-2020, de manera tal, que se pudiese superar las barreras existentes y valorar los beneficios de la CHP. Como parte de sus tareas, los autores realizaron un nuevo catastro de la potencia instalada en el sector industrial manufacturero y fabricación de productos de la minería, a partir del cual se actualizó la estimación del potencial estimado en el estudio de 2004. Del catastro se determinó que, de las plantas en operación con CHP existía una potencia 864 MWe, lo que equivalía al 6% de la capacidad de potencia instalada para la generación de energía eléctrica en Chile, de los cuales 689 MWe usan biomasa y 175 MWe usan combustibles fósiles. A partir de estos datos, se efectuó la estimación del potencial de CHP, que fue de 875 MWe, adicionales a la potencia instalada. Para lograr este objetivo, se requiere de diferentes acciones, entre las que se destaca la superación de las barreras del conocimiento, económicas y regulatorias.

3. METODOLOGÍA

En la génesis de este estudio, se creía que la primera estimación del potencial de CHP y catastro de industrias con potencia instalada de CHP en Chile se había hecho el año 2004 (Gamma Ingenieros, 2004). Debido a que es uno de los más citados en la literatura y su contenido ofrece una gran cantidad de información técnico-económico sobre la CHP en el país, este estudio fue fundamental para la comunidad científica y profesional. Sin embargo, como fue mencionado en el apartado 2, previamente ya existía un estudio de potencial de CHP del año 1995 (Deuman Ingenieros, 2003), en el cual se estimó que dicho potencial técnico era de 1000 MWe, de los cuales cerca de 260 MWe se consideraban como factibles. La estimación del potencial en este primer estudio de potenciales se realizó a partir de las industrias que usarían principalmente sus generadores a vapor para producir electricidad, y en el caso del calor producido sería dedicado a los procesos productivos. La mayor parte de esta CHP se estimaba que sería para autogeneración, con muy poca cantidad de excedentes para la venta. Entre los sectores industriales analizados estuvo la minería del cobre, hierro y acero, cerámicas, ladrillo, cemento, pulpa y papel, alimentos, manufactura de llantas, hospitales, hoteles y condominios residenciales.

Más recientemente, durante el año 2010 un estudio realizado por del Instituto de Asuntos Públicos de la Universidad de Chile (Universidad de Chile, 2010), generó las bases fundamentales para elaborar un plan de acción efectivo con objeto de incentivar la implementación masiva de la CHP en la matriz energética entre los años 2010-2020, lo cual permitiese superar las barreras existentes y valorar los beneficios de la CHP en Chile. Además, en dicho estudio se generó una actualización del potencial de CHP estimado el año 2004, enfocado principalmente en el sector I&M, ya que estos poseían los potenciales más altos de CHP.

En términos generales, la metodología empleada por el Instituto de Asuntos Públicos el año 2010 consistió en el estudio de 11 ramas de producción, sus respectivos procesos productivos y la demanda energética anual de estos. Luego, a partir de los usos del calor, tipo de proceso y combustibles empleados, se determinó el calor útil que eventualmente podría ser aprovechado en cogeneración, para luego asignar a estos una tecnología de cogeneración apropiada según el tipo de establecimiento productivo. Finalmente, a partir de la relación electricidad producida versus calor útil para cada tecnología se estimó el potencial eléctrico que podría ser instalado. En base a estos dos trabajos, el presente estudio pretende establecer cuánto se ha avanzado en la adopción de CHP en Chile, estableciendo el potencial eléctrico que podría estar disponible para integrar al Sistema Eléctrico Nacional. Todo esto bajo la base de realizar un nuevo catastro de las empresas, no solo del ámbito I&M, sino que incluya otros rubros, donde se identifiquen los potenciales instalados de CHP en el país. De manera tal, que la integración de las capacidades de las empresas o industrias identificadas se puedan visualizar como posible medida para introducir una mayor flexibilidad al sistema eléctrico, al mismo tiempo que para alcanzar los objetivos de adopción de energías renovables en Chile, tanto en el mediano como largo plazo.

La generación del catastro de las empresas e industrias que poseen capacidad instalada de CHP, se ha desarrollado en gran medida, de manera similar a la propuesta por (Universidad de Chile, 2010). Se hizo una revisión y búsqueda exhaustiva en las diferentes bases de datos de las fuentes públicas gubernamentales, empresas y agencias ligadas al ámbito de la energía, en las cuales se disponen variables, tales como, la capacidad instalada eléctrica y térmica, energía eléctrica inyectada a la red, portador energético empleado para cogenerar, localización geográfica, año de inicio de operación y el tipo de tecnología empleada (turbina de gas o vapor y motor de combustión interna). Entre las fuentes consultadas destacan el Ministerio de Energía (MINENERGIA), el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), la CNE, el Servicio de Evaluación e Impacto Ambiental (SEIA) y se contactaron empresas directamente para confirmar que las plantas de CHP continúan en operación. En dichas fuentes de información no solo se obtuvieron las variables antes mencionadas de las plantas de CHP en funcionamiento, sino también aquellos proyectos que han sido aprobados para su implementación, según lo informa el SEIA. Adicionalmente, se obtuvo el registro de otro grupo de proyectos de CHP ya implementados como es el caso del trabajo realizado en conjunto por la Agencia Alemana para la Cooperación (Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit - GIZ) y la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE), así como de forma independiente el ejecutado en las empresas Abastible y Schwager.

4. RESULTADOS

La evolución histórica del ingreso en operación de las plantas de CHP en Chile (Figura 1), muestra un aumento considerable y sostenido en el último periodo, en especial desde 1990. Dentro de esta evolución es posible identificar tres hitos fundamentales. El primero radica en la instalación de la primera planta, la cual, comenzó a operar en el año 1930; el segundo hito, corresponde a 1990, dado que, a partir de este año se da un salto cuantitativo en el país respecto a las exportaciones forestales chilenas (ODEPA, 2007); de ahí que las empresas ligadas a este rubro, donde se requieren grandes consumos de electricidad y calor, se hayan visto incentivadas por implementar la tecnología de la CHP. De hecho, en el catastro realizado se puede observar que de los 240.7 MWe y 2338.9 MWt agregados entre los años 1990 y 1995 el 83.4% y 97% de potencia eléctrica y térmica, respectivamente, corresponden al sector forestal, celulosa y papel. Mientras que, el tercer hito se sitúa entre los años 2004 y 2008, influenciado principalmente por dos causas, la primera, es la crisis del gas, se trata de la disminución de importaciones de gas proveniente de Argentina, motivo por el cual, el mix de generación se volcó hacia el uso de combustibles fósiles de elevado valor y altamente

contaminantes, como es el caso del diésel (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2016; Systep Ingeniería y Diseño, 2009; International Energy Agency, 2009); y la segunda, es la implementación de nuevas políticas públicas respecto del uso de las energías renovables y eficiencia energética, donde además se recoge por primera vez el término Cogeneración Eficiente, Ley 20257 (Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, 2008).

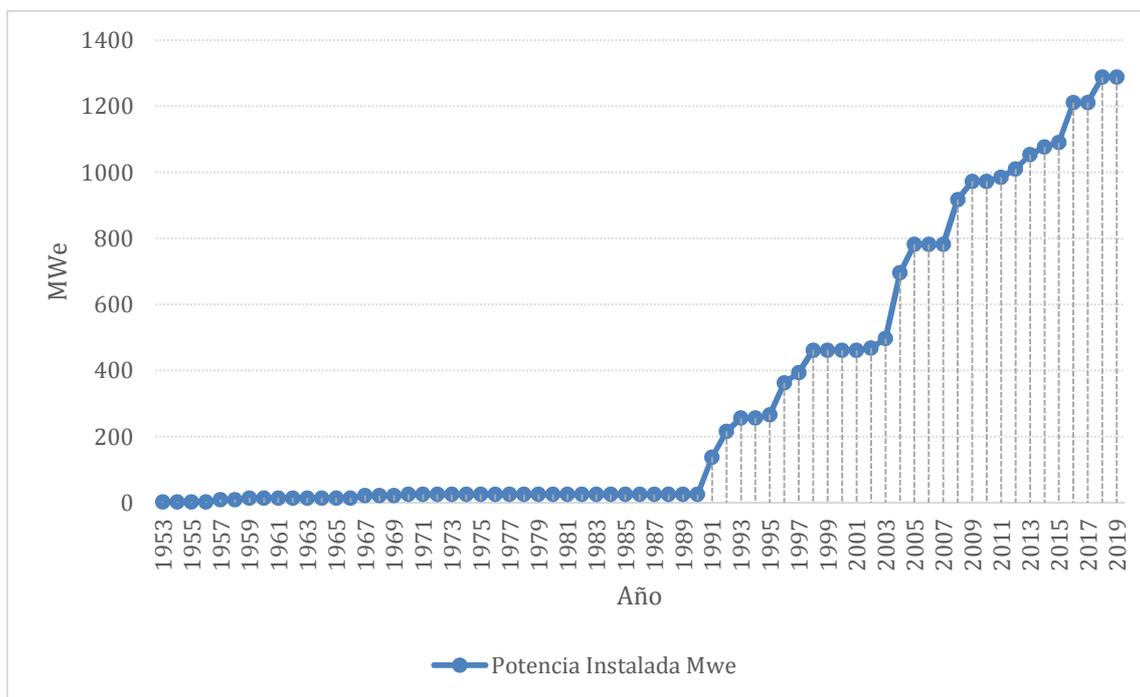


Figura 1. Evolución histórica del ingreso en operación de las plantas de CHP en Chile
Fuente: cálculos propios

A partir del catastro actual de plantas de CHP que operan en Chile, se concluye que, existen actualmente 54 plantas, de las cuales, 49 se encuentran en operación, presentando 1179.77 MWe y 6107.72 MWt. Las otras 5 plantas se encuentran en construcción o bajo aprobación de proyecto, según informa el SEIA. De estas últimas, la capacidad es de 108.1 MWe y 558 MWt, eléctrica y térmica respectivamente. En el mapa de distribución nacional de las plantas, mostrado en la figura 2, se destaca que, la mayor parte de las plantas están ubicadas en la zona centro sur del país, representando un 93% del total de las plantas. Además, la figura 2 representa la potencia térmica y eléctrica instalada en cada una de las regiones que componen el país, lo cual se analizará más adelante.

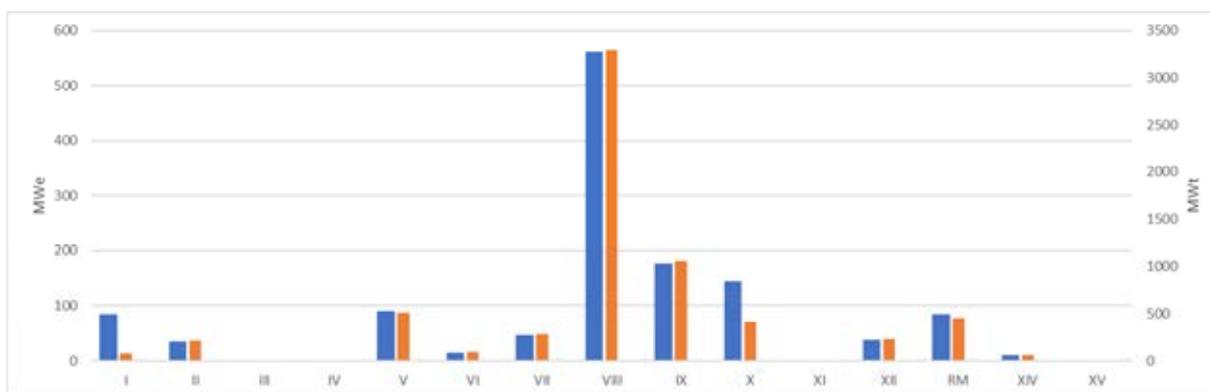


Figura 2. Distribución del potencial de generación de plantas de CHP en Chile por región en 2018
Fuente: cálculos propios

En relación a la inyección de energía a la red de energía eléctrica nacional, se tiene que el año 2017 se inyectaron 2669.8 GWh, correspondientes al 3.6% del total de la energía eléctrica producida en el país. Las plantas que no inyectaron a la red son 33, las cuales suman 963 MWe de potencia instalada, y cuyos tamaños oscilan entre 0.12 y 77 MWe. De este total, 28 poseen una capacidad de generación instalada menor a 20 MWe, lo cual, las hace aptas para ingresar en la categoría de CHP Eficiente, según lo recoge la Ley 20257. Esto puede traducirse en ganancias económicas, si tuvieran excedentes de energía eléctrica, ya que podrían según la actual normativa vender dichos excedentes al Mercado Eléctrico con ventajas sobre otras fuentes de energía (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2012; Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción: Subsecretaría de Economía fomento y Reconstrucción, 2005). Además, es importante destacar que, quizás existan otras plantas de CHP con capacidad instalada menor a 3 MWe que no aparezcan en las bases de datos con las cuales se desarrolló el catastro actual. En cuanto a las plantas que sí inyectaron energía eléctrica al sistema, estas poseen una potencia eléctrica instalada de entre 6.4 MWe y 140 MWe.

La potencia instalada total en el país hasta junio de 2018 era de 23160.91 MWe de los cuales el 5.1% equivalen a las plantas de CHP en operación. La disminución de este valor, con respecto al que mostrado en el estudio de (Universidad de Chile, 2010), se debe principalmente a la puesta en marcha de las diferentes centrales de ERNC (solar fotovoltaica y eólica) que fueron implementadas a partir de las exigencias en la Ley 20257, que señala la obligatoriedad de incluir un porcentaje de ERNC a todas las empresas comercializadoras. (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2018). También, señalar que con respecto al catastro de (Universidad de Chile, 2010) existe una diferencia de 76.4 MWe de capacidad instalada. La diferencia se debe a que algunas de las industrias dedicadas al sector forestal, celulosa y papel han modificado su potencia instalada, incrementando o disminuyendo sus capacidades en 59.5 MWe y dos de las plantas catastradas antes de 2010 han dejado de operar, con una capacidad de 16.9 MWe.

En base a este catastro, se ha estudiado el panorama mundial respecto de la penetración de plantas de cogeneración en la matriz eléctrica y producción de energía en distintos países para el año 2015, último año para el que existen datos disponibles a nivel internacional (figura 3). En el caso de Chile, la producción de energía eléctrica mediante CHP el año 2015 representa un 3.2%¹ del total de la energía generada en el país, mientras que, en países como Eslovaquia, Alemania y USA la proporción de energía proveniente de CHP sobre el total de generación eléctrica del país es de 78.5%, 12.2% y 12%, respectivamente; lo que coloca a Chile en el grupo de países con menor penetración de Cogeneración en la matriz eléctrica. Esto ocurre fundamentalmente, porque estos países cuentan con regulación específica para CHP que lleva en ejecución muchos años y que posee mayores niveles de complejidad técnica-económica respecto de la regulación chilena. Además, estas leyes incentivan el uso de la CHP tanto para la generación eléctrica como de calor.

¹ Con base en el Anuario de la Comisión Nacional de Energía del año 2015 (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2016), en todo Chile se generaron 72175 GWh. Por otro lado, de acuerdo al catastro desarrollado en este trabajo, 2324.9 GWh fueron generados e inyectados a la red a partir de plantas de CHP, lo cual, representa un 3.2 % del total de la energía producida en el país ese mismo año.

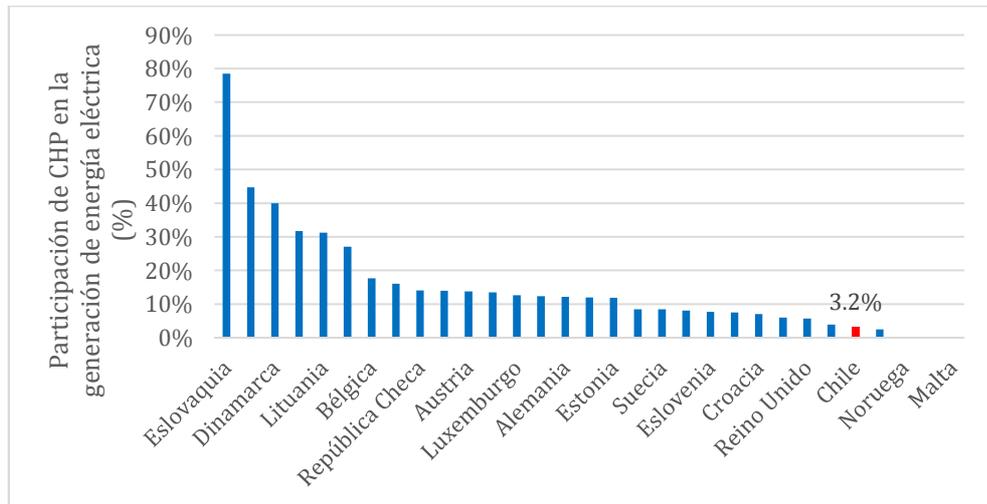


Figura 3. Contribución de CHP a la generación total de electricidad (en porcentaje)
Fuente: Eurostat, U.S. Department of Energy, cálculos propios

A partir del catastro de plantas de CHP halladas en Chile operando al año 2016, se ha determinado que la energía térmica que estos equipos podrían suministrar para los distintos procesos productivos es de 54325753 MWh en el año, teniendo 1210 MWe de capacidad eléctrica instalada. Asimismo se ha identificado, a partir del Balance Nacional de Energía del año 2016 (Comisión Nacional de Energía del Gobierno de Chile, 2016), el consumo energético final empleado para fines calóricos en los sectores I&M, Comercial y Público. En consecuencia, se consideró los combustibles petróleo crudo, gas natural, carbón, biomasa, biogás, derivados del petróleo, derivados del carbón y gas corriente, cuyo consumo final suma 91176418 MWh térmicos para el año bajo análisis. Finalmente, considerando la totalidad de energía consumida por cada uno de los tres sectores productivos estudiados (según el Balance Nacional de Energía), se estima la capacidad eléctrica en CHP que debería estar instalada para satisfacer la demanda energética para fines térmicos monitoreada el año 2016. En base a estos cálculos, se ha determinado un potencial total para CHP en Chile de 1386 MW eléctricos al año 2016, de los cuales 821 MWe corresponden al Sector de la I&M, 481 MWe corresponden al Sector Comercial, y finalmente 84 MWe pertenecen al Sector Público (figura 4).

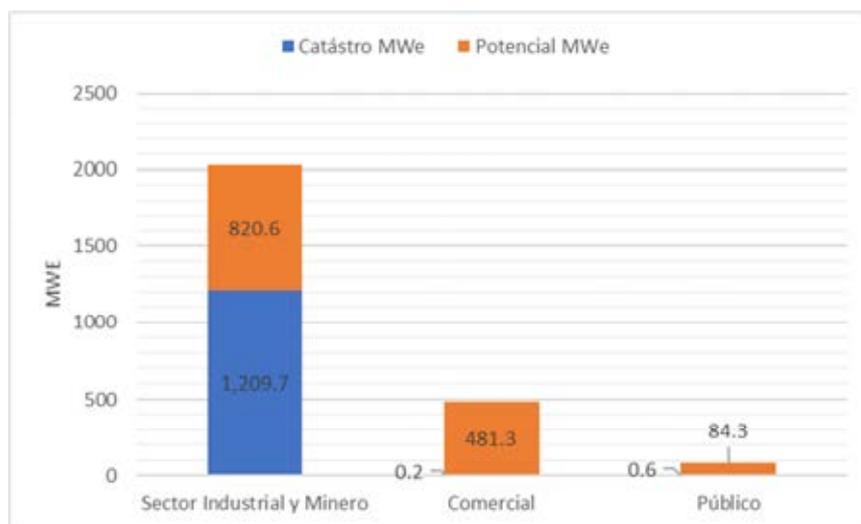


Figura 4. Capacidad instalada y potencial de generación por sector económico
Fuente: cálculos propios

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo es generar un catastro de las plantas de CHP existentes en Chile que recoja las características de las instalaciones en industrias específicas, así como su evolución, con el objetivo de extrapolar los datos al resto de la economía y obtener un potencial de CHP para el país. Para ello, se han consultado tanto fuentes públicas, así como entrevistas con empresas para conocer el estado actual del parque de plantas de CHP en el país. El análisis del catastro de Chile muestra que en los últimos años la capacidad instalada de plantas de CHP ha ido en aumento, en especial en el sector industrial.

Una de las principales razones para este avance en el periodo 2000-2018 es el desarrollo de un marco regulatorio y procedimientos claros para registrar plantas de CHP eficiente, que permite al cogenerador eficiente acogerse a la Ley Net Billing, para clientes regulados con capacidad excedente menor a 100 kW; o bien, al régimen correspondiente a Pequeños Medios de Generación. Otro de los avances importantes en este periodo es la instalación de CHP en tres hospitales, privilegiando el sector sur del país, altamente consumidor de calor debido a las bajas temperaturas. Estas instalaciones suponen un desarrollo importante debido a que representan uno de los primeros avances en la instalación de CHP en el sector público, muy poco desarrollado hasta el momento.

En cuanto al análisis del potencial, los resultados muestran que, pese a que Chile ha mejorado, aún existe un amplio margen de acción, especialmente en los sectores comercial y público. Estos resultados, junto con el gran potencial del sector industrial, representan una opción para introducir una mayor flexibilidad en el sistema eléctrico mediante políticas de gestión de la demanda. La relevancia de este estudio estriba en que la capacidad de participación de estas instalaciones está limitada a los incentivos que la regulación contemple, que en el caso de los servicios complementarios se encuentra en discusión. Por tanto, estudios de potencial como el presente pueden ayudar a ajustar la regulación a las características de la capacidad disponible y su potencial, con el fin de maximizar la participación de CHP en estos esquemas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT) y al Ministerio de Educación e Investigación de Alemania (BMBF), los cuales, en el marco del proyecto BMBF150075: “Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized CHP energy dispatch scheduling and demand side management”, han hecho posible el desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

Comisión Nacional de Energía del Gobierno de Chile, Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2016). Balance Nacional de Energía 2016. Energía Abierta. Disponible en: <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/244115/bne-2016-balance-energia-global-tcal/>, último acceso en Julio 31, 2018.

Deuman Ingenieros (2003). Transferencia de Tecnología Para El Cambio Climático. Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile (UNTEC).

Gamma Ingenieros (2004). Evaluación Del Desempeño Operacional y Comercial de Centrales de Cogeneracion y Estudio Del Potencial de Cogeneracion En Chile. Santiago de Chile: Comisión Nacional de Energía. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/39918717/Cogeneracion-Varios-casos>, último acceso en Julio 31, 2018.

GIZ (2014). Resumen Empresas Industriales Con Potencial de Cogeneración En Chile. Santiago de Chile: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

International Energy Agency (2009). Chile Energy Policy Review 2009. OECD. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/chile-energy-policy-review-2009_9789264073159-en, último acceso en Agosto 16, 2018.

Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción (2008). Ley 20.257. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Legislación Chilena.

Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción: Subsecretaría de Economía fomento y Reconstrucción (2005). Decreto 244. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Legislación Chilena. Disponible en: <http://www.leychile.cl/N?i=246461&f=2015-09-30&p=>, último acceso en Julio 31, 2018.

Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2012). Ley 20571. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Legislación Chilena. Disponible en: <https://www.leychile.cl/N?i=1038211&f=2014-09-06&p=>, último acceso en Julio 31, 2018.

Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, Comisión Nacional de Energía del Gobierno de Chile (2016). Anuario Estadístico de Energía 2005-2015. Comisión Nacional de Energía.

Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, Comisión Nacional de Energía del Gobierno de Chile (2018). Anuario Estadístico de Energía 2007-2017. Comisión Nacional de Energía.

ODEPA (2007). Evolución de Las Exportaciones Forestales 1990-2005. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) -Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile. Disponible en: Odepa.Gob. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/evolucion-de-las-exportaciones-forestales-1990-2005-2>, último acceso en Julio 31, 2018.

Systep Ingeniería y Diseño (2009). Reporte Sector Eléctrico SING-SIC Noviembre 2009. Reporte, 11. Systep. Disponible en: http://systep.cl/documents/reportes/112009_Systep_Reporte_Sector_Electrico.pdf, último acceso en Julio 31, 2018.

Universidad de Chile (2010) Estudio Para El Desarrollo de La Cogeneración En Chile. Miniserio de Energía del Gobierno de Chile.

Universidad de Chile (2013). Análisis de Barreras, Seguimiento de Proyectos y Diseño de Una Línea de Apoyo a La Cogeneración. Programa de Estudios e Investigaciones en Energía, Corporación Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile.

Varbanov, P.S., y Klemeš J.J. (2011). Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems for the Food and Beverage Processing Industries. *En* Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems, pp. 395–426. Elsevier.

ABSTRACT

The oldest Combined Heat and Power (CHP) project in Chile dates back to 1930 and operated until 1997. However, although the CHP technology has been introduced for a long time, few studies have analysed its potential and evolution. The development of a cadastre that includes all installed capacity and their characteristics is the first step to analyse the country's potential. The importance of this exercise lies in the potential integration of greater CHP capacities in the electric system as a mean to address the intermittence of non-conventional energy sources. In addition, due to the possibility to transfer both the electricity and heat not consumed in the production processes into the grid, CHP plants can help achieve energy efficiency objectives. However, for this to happen it is necessary the availability of a regulatory framework designed according to the capacities and characteristics of the CHP capacities installed. This article aims to identify the characteristics of the CHP capacities in specific industries as well as their evolution during time, in order to extrapolate the data to the rest of the economy and obtain a CHP potential for the country. For this purpose, previous cadastres have been consulted and the information complemented with interviews with companies to know the current status of the CHP plants in the country.

Keywords: Combined Heat and Power, energy efficiency, power system flexibility

AHORRO ENERGETICO EN ESTUFAS DE CURADO DE TABACO DEL TIPO BULK-CURING MEJORADAS

Miguel Condori¹, Federico Albesa², Carlos Martínez

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, Universidad Nacional de Salta,
CONICET, Av. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax 0387-4255489, e-mail: miguel.angel.condori@gmail.com

Recibido 08/08/18, aceptado 12/09/18

RESUMEN: El objetivo del trabajo es producir ahorro energético en el proceso de curado de tabaco a partir de una propuesta de reconversión de las estufas existentes en la provincia de Salta. Se presentan los resultados obtenidos de la construcción y ensayo de una estufa de curado de tabaco del tipo bulk-curing, mejorada con la inclusión de precalentamiento de aire con energía solar y mejoras estructurales y de aislamiento térmico. Se pudo registrar durante varios estufados el consumo de gas natural. Comparada contra una estufa testigo de similar construcción el ahorro energético que produce la estufa mejorada es del 30% y una reducción en el tiempo del curado del 20%. Respecto de una estufa convencional con insuficiente aislamiento térmico y cuyo consumo es de 0,59 m³/kg el ahorro energético es del 55%. Respecto a una estufa convencional sin recuperación de calor cuyo consumo es de 0,915 m³/kg, el ahorro energético es del 70%.

Palabras Clave: energía solar, ahorro energético, estufas de tabaco, tabaco Virginia

INTRODUCCION

En el marco del paradigma del desarrollo sostenible resulta vital la incorporación de fuentes energéticas renovables en la matriz productiva regional. En el documento final de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (RIO+20) se enfatizó la necesidad de aumentar la participación de fuentes de energía renovable en la matriz energética junto con la adopción de medidas de planificación regional. Este hecho constituye una oportunidad notable para las regiones que poseen potencial para el aprovechamiento de fuentes energéticas renovables, como es el caso de la energía solar en la provincia de Salta (Salim y Rafiq, 2012).

En la provincia de Salta, específicamente en el Valle de Lerma, la agricultura es la actividad económica de mayor envergadura; destacándose la producción tabacalera por la trascendencia socioeconómica al brindar trabajo directo e indirecto a más de 130.000 personas (Nobleza Piccardo, 2005). La producción anual ronda las 40.000 T de tabaco Virginia curado, casi el 50% de la producción nacional. Existe en la provincia un amplio parque de estufas de curado (6.000 de acuerdo a datos de la Cooperativa de Productores Tabacaleros de la Provincia de Salta y aproximadamente 15.000 para toda la región NOA), de las cuales el 85% se encuentran abastecidas por gas natural, mientras que el 15% restante es abastecido por leña. El mencionado nivel de producción provincial, consume aproximadamente 4x10⁷ m³/año de gas natural (Rodríguez Faraldo y Zilocchi, 2012). Este consumo produce una Huella de Carbono directa de aproximadamente 1x10⁵ tCO₂e (Dib Ashur, 2013).

Si bien el secado de productos agrícolas es uno de los campos en los que más se ha avanzado con respecto al aprovechamiento de la energía solar, existen pocos antecedentes de sus aplicaciones en el proceso de curado de tabaco. Los requerimientos técnicos de humedad y temperatura en valores

¹ Investigador Independiente CONICET

² Técnico Asistente CONICET

adecuados y continuos, así como la influencia del curado sobre la calidad final del producto, son algunos de los desafíos que deben sortearse. En el contexto de la problemática energética y el impacto ambiental, adquiere vital importancia la disminución del consumo de energía de fuentes convencionales mediante el mejoramiento de la eficiencia energética de los dispositivos industriales actuales, sobre esto existen tanto antecedentes locales como internacionales (Siddiqui, 2001). Una de las experiencias más antiguas con curado de tabaco Virginia empleando energía solar es reportada por Huang y Bowers (Huang y Bowers, 1986). Ellos emplearon un secadero de tipo invernadero con asistencia solar térmica, que también podía utilizarse para la germinación y crecimiento de plantines. Desarrollaron dos tipos de estufas híbridas, donde la fuente convencional de energía era gas licuado (LPG). En el primer caso se trató de un secadero invernadero con paredes y techo colectores. Las mismas fueron revestidas con placas de fibra de vidrio transparente, ubicadas por encima de placas absorbedoras negras de plástico. El segundo modelo, se refiere a una estufa invernadero de tipo cascarón (shell). La estructura estaba totalmente conformada por colectores solares, construida con placas de fibra de vidrio transparente. Incluía también un sistema acumulador de piedras. Los resultados demostraron para el primer modelo ahorros del 15-20% en el consumo de gas, mientras que para el segundo caso el ahorro ascendió al 40%.

Pope diseñó en 2008 un prototipo de estufa híbrida. Este prototipo contaba con una estructura metálica y una serie de placas de policarbonato corrugado para formar el sistema de colectores que recubrían a la misma. Con una capacidad para curar 12 T de tabaco verde, se empleó un ventilador de 3 HP para eliminar aire caliente de los colectores durante la etapa de amarillamiento, que luego se sumaba al ventilador principal de 10 HP en el resto del proceso de secado. El consumo de gas propano de esta estufa se comparó contra una estufa convencional de idénticas características y antigüedad. Ambas estufas fueron cargadas el mismo día, con la misma variedad de tabaco cosechado bajo las mismas condiciones. El prototipo mostró un consumo promedio 32% menor que el secadero convencional, reduciendo además el tiempo de curado en 16 h (Pope, 2008).

A nivel local el INENCO desarrolló, construyó y evaluó, durante los años 1977- 1980, un sistema de curado de tabaco con energía solar. Este consistía de una batería de colectores solares y acumuladores de calor con piedra. Durante el ensayo a escala de prototipo, los resultados promedios de 4 ciclos de curado mostraron ahorros energéticos del 70% en condiciones de buenas radiación y del 28% en días nublados. Posteriormente, se efectuó la construcción del sistema a escala real, con una superficie colectora de 900 m² para un grupo de tres estufas, con acumulador de piedra de 180 m³. Los ensayos arrojaron buenos resultados. Sin embargo, el banco de colectores con superficies superiores a los 300 m² por estufa representó una fuerte limitante para su transferencia (Saravia et. al, 1978; 1979).

Actualmente, debido al reajuste tarifario del servicio de provisión de gas natural, con incrementos del 116 % respecto del año pasado, el sector tabacalero viene sufriendo pérdida de competitividad. Por esta razón, este sector ha recobrado el interés para incorporar fuentes alternativas de energía al proceso de curado del tabaco y medidas que tiendan al ahorro energético. En este trabajo se presentan los aspectos constructivos y el ensayo de un prototipo mejorado de estufa de curado de tabaco de tipo bulk-curing, tendiente a la sustitución parcial de la energía que utilizan las estufas convencionales, mediante mejoras que permiten el ahorro energético y el uso de la Energía Solar.

LAS ESTUFAS CONVENCIONALES

El tabaco Virginia requiere de un proceso de curado en estufa que obliga a una inversión inicial alta. En la región, la mayoría de las estufas corresponden al modelo bulk-curing, con estructuras metálicas alargadas del orden de los 12 m. La falta de mantenimiento y las precarias condiciones de aislación térmica provocan que las estufas presenten una gran deficiencia energética. Estudios realizados en la región muestran que solo un 30% de la energía suministrada (gas natural y electricidad) es efectivamente empleada en el secado de las hojas (Altobelli *et al.*, 2011). Las mayores pérdidas de calor se producen a través del suelo desnudo, el perímetro basal de mampostería, los numerosos puentes térmicos de la estructura interior de la cámara, las bisagras y en el flujos de aire caliente que se pierde a través del picaporte y por debajo de las compuertas (Altobelli, *et al.*, 2010).

Las estufas bulk-curing son construcciones de chapa metálica de 12 m de largo. Existen modelos de dos o tres secciones (túneles), por lo general, con tres niveles de carga de bastidores (perchas), donde se cargan aproximadamente 10 T de tabaco fresco que rinden unos 1800 kg de tabaco curado. Las perchas se cargan de forma uniforme, tanto en densidad como en peso (45-50kg de tabaco verde), y se colocan en la estufa bien juntas una al lado de la otra. Esto es necesario para cerrar los espacios libres y hacer que el aire circule a través de las hojas de tabaco. Las perchas constan de una barra metálica de sección en “U” encima de la cual se coloca la hoja y otra con “pinches” que encaja en la sección anterior. En la parte posterior de la estufa se encuentra la unidad de calor, el que es suministrado por un quemador alimentado a leña o gas. El aire caliente circula forzado por un ventilador eléctrico de 5,5 HP. El calor generado por el quemador, calienta un intercambiador de calor por el exterior del cual circula el aire adquiriendo la temperatura adecuada. Luego ingresa a la estufa por la parte inferior y pasa por entre las hojas de tabaco colocadas en los bastidores. Este aire se hace recircular hacia la unidad de calor o es expulsado al exterior, dependiendo de la etapa en que se encuentra el proceso de curado.

El proceso de curado en estufa comprende de cuatro etapas, de acuerdo a los cambios que se llevan a cabo y las exigencias de temperatura y humedad que requieren en cada una de ellas. Estas etapas son: amarillamiento, fijado de color, secado de lámina y secado de nervadura.

Amarillamiento.

Se inicia con una temperatura en el interior de la estufa de 38°C, que conserva hasta que las hojas alcanzan el color amarillo. El tiempo en que esto sucede varía de 30 a 72 horas. La humedad relativa debe mantenerse en valores superiores al 80%. El tabaco es sometido a una condición de saturación con el objeto de que abra sus poros, quedando la estufa sin renovación de aire, para lo cual se cierran las ventanas de la unidad de calor, produciendo recirculación de aire húmedo.

Fijación de color.

La temperatura se eleva gradualmente hasta alcanzar 43 °C. La humedad relativa se mantiene en torno al 50-65%. La pérdida de peso desde el inicio alcanza un 34%. La tonalidad final del tabaco depende de la velocidad de evaporación, el brindar el tiempo necesario ayuda a mantener la calidad del tabaco.

Secado de lámina: La temperatura se eleva hasta alcanzar los 54-56 °C, y se mantiene esta condición hasta que la mitad de la superficie se encuentre seca. A partir de ese punto, la temperatura se eleva hasta los 58-60 °C y se la conserva hasta que se ha secado toda la lámina. Por lo general requiere un período entre 36-48 horas. Para evitar el escaldado del tabaco, la humedad relativa se la debe mantener en un valor superior al 40%.

Secado de nervadura.

Se incrementa la temperatura hasta llegar a los 69-71 °C, y se la mantiene hasta que las nervaduras llegan a quebrarse frente a la fuerza manual. La humedad relativa al finalizar debe ser próxima al 10%. Esta última etapa puede tener una duración de hasta 60 horas. Previo a la descarga de la estufa se deja enfriar el recinto y se humidifica mediante pulverizadores de bajo caudal, con el fin de evitar pérdidas del material por quebraduras durante la manipulación.

La temperatura de la estufa se regula mediante el control de la entrega de calor producido por combustión, mientras que la humedad se regula con la ventilación (apertura y cierre de ventanillas). Durante su curado, las hojas de tabaco pierden aproximadamente el 85% de su peso. Esto implica un fuerte consumo energético al que también están asociadas pérdidas térmicas. Ulivarri, 1990, reporta que las mayores pérdidas de calor de las estufas se producen por el techo, cuando éste es de zinc (20%) y por la chimenea (con los humos provenientes de la combustión), que alcanzan al 22.6%. En la actualidad la mayoría de estufas cuenta con aislación térmica con lana de vidrio, y en algunos casos las chimeneas del quemador atraviesan el interior de las estufas por su parte superior para salir por encima de las puertas. Asimismo, el motor eléctrico de 5,5 HP, que mueve el aire, posee un tiempo de funcionamiento que ronda las 200 horas por cada estufada.

La mayoría de estufas poseen fisuras que permiten la pérdida de calor. Las pérdidas ocurren principalmente en la parte basal de las paredes de las estufas, debido al material de cual están

constituidas (mampostería) y la carencia de aislación térmica en esa zona. Otra fuente importante de pérdida de calor se produce directamente en el suelo, el cual se encuentra totalmente desnudo y generalmente húmedo, constituyéndose en otra masa para el proceso de secado, elevando el consumo de combustible (Altobelli *et al.*, 2011).

LA ESTUFA MEJORADA:

Estufa testigo.

La estufa convencional que se utilizó de testigo es de dos túneles (180 perchas), con un ancho exterior de 3.12 m, 12 m de largo y una altura aproximada de 3.47 m en la cumbre. La estructura está conformada por caños estructurales metálicos de 40 mm por 20 mm, se utiliza en paredes, techo y compuertas, se encuentran revestidos en el interior y el exterior con chapas galvanizada acanalada, con aislación de 0,05 m de fibra de vidrio entre ellas. Tanto las puertas como las ventanas carecen de burletes de goma que impidan la pérdida de flujo de aire caliente. El piso, se encuentra desnudo, sin ningún tipo de terminación ni aislación térmica, y tiene una pendiente del orden del 1% hacia la parte posterior de la estufa. La parte basal de las paredes perimetrales y puerta se halla construida con mampostería (construcción de ladrillos y cemento) de una altura de 0.5 m.

El abastecimiento energético lo proporciona un quemador de gas natural (AUTO-QUEM, modelo LXH-1008), controlado por un termostato digital con sonda termopar al centro de la estufa de curado. El quemador entrega una potencia de 80.000 Kcal/h y trabaja a una presión de 1600 kg/m². El mismo se encuentra conectado a un intercambiador de calor indirecto del tipo gas-aire, de acero inoxidable, que evita el ingreso a la cámara los gases provenientes del proceso de combustión, impidiendo así la formación de nitrosaminas específicas del tabaco (TSNA).

Estufa Mejorada.

Las mejoras introducidas respecto a la estufa convencional fueron cinco:

- a) se convierte el techo de la estufa en un pre-calentador solar de aire, para lo cual se pinta el techo de negro mate y se coloca una estructura recubierta por policarbonato alveolar de 6 mm de espesor, conformando un ducto que se conecta con la unidad de calor a nivel del techo para introducir aire precalentado a la unidad. El aire se calienta de tres formas: por las pérdidas de calor de la estufa por el techo, por la recuperación de calor de combustión que escapa por las chimeneas, para lo cual se prolongan por el exterior de la estufa, y por ganancia de radiación solar global que absorben las chapas pintadas de negro de techo durante el día.
- b) se modifica la unidad de calor incorporando un intercambiador de calor del tipo banco de tubos cruzados de 3 filas por 10 tubos de 5 cm de diámetro cada uno, y se cambia la toma de aire para permitir ingreso del aire precalentado desde el techo de la estufa; esta modificación, permite descargar mayor cantidad de la energía de combustión en el aire de la unidad de calor, disminuyendo las pérdidas térmicas por chimenea. También a la unidad ingresa aire precalentado del techo lo que reduce el consumo del quemador de gas.
- c) se incorpora calefacción térmica auxiliar al interior de la estufa mediante un sistema de losa radiante alimentada con un colector solar y acumulador de agua; Consta de un sistema de losa radiante convencional de dos circuitos de tubos termo fusión conectado a un sistema un colector solar Split de 30 tubos, un tanque de 300 L aislados térmicamente y un sistema inteligente de control que comanda la bomba y dos válvulas solenoides para circular el flujo de agua solo cuando puede incorporar energía a la estufa. Se ha desarrollado la lógica de funcionamiento.
- d) se realiza recuperación de calor de las salidas de humo del quemador de gas, que se utiliza para precalentar el aire que ingresa a la unidad de calor de la estufa; para lo cual se coloca una caja de distribución aislada térmicamente que tiene como entrada dos caños de 4 pulgadas, habituales en las estufas convencionales, y salida de cuatro caños redondos de 3 pulgadas, colocados sobre el techo y por el interior y a lo largo del colector solar, descargando el humo de combustión por cuatro sombreretes a la altura de la unidad de calor.
- e) se incorpora aislación térmica en suelo, paredes perimetrales para evitar puentes térmicos y filtraciones de aire en la estructura. Por debajo del suelo de la losa radiante se colocó placas de poliestireno expandido de 3 cm de espesor de alta densidad, las paredes perimetrales se aislaron con placas de goma espuma ignífugo protegida por encima con placas de chapa lisa. Se evitan los

puentes térmicos del contacto entre la estructura y la chapas externas mediante aislante térmico de poliuretano y se coloca entre la estructura las chaspas internas y externas lana de vidrio de 1 ½ pulgadas con cara de papel aluminio hacia el interior.

En las Figuras del 1 al 4 se muestran distintas etapas constructivas de la estufa mejorada. La estufa testigo también aparece en las fotos.



Figura 1: Etapa constructiva de la estufa mejorada. En la parte alta el sistema de recuperación de calor del quemado de gas



Figura 2: Vista lateral y posterior de la estufa mejorada. A la derecha la unidad de calor que toma aire precalentado del techo.



Figura3: Etapa constructiva del interior. Se observa el piso de cemento con losa radiante por abajo y el aislamiento en las paredes perimetrales.



Figura 4: Sistema de colector solar en el techo de la estufa mejorada. Cubre el sistema de recuperación de calor.

RESULTADOS

Sistema de Medición.

Durante los ensayos se midieron los parámetros de consumo de gas, temperaturas del interior de la cámara, humedad relativa y peso de una muestra de tabaco. En las estufas bajo análisis se instalaron

medidores de gas certificados, que fueron acoplados a los caños de conducción de cada una de las estufas ensayadas para poder contar con registros de volumen de gas consumido individualmente, por estufada y a lo largo de los ensayos. Durante estos ensayos no se pudo poner en funcionamiento el suministro de calor solar mediante losa radiante por lo que se espera todavía mejorar la performance de la estufa prototipo durante los ensayos de la próxima campaña de estufado.

Se construyó una unidad de procesamiento lógico con una tarjeta micro controlador Arduino UNO y una tarjeta computadora Raspberry Pi. La temperatura y la humedad relativa fueron medidas con sensores digitales DHT 22, el peso de una muestra de hojas fue medida con una celda de carga con galgas extensiométricas.

Se logró ensayar el prototipo mejorado junto con la estufa testigo durante una sola estufada, coincidiendo con el fin de la campaña a fines de abril, contrastando su funcionamiento contra la estufa convencional en forma simultánea. Para comparar los consumos de Gas Natural de las dos estufas bulk-curing, se utilizan dos medidores de Gas Itrón idénticos con las siguientes características: Caudal máximo: 10 m³/h, Caudal mínimo: 0,06 m³/h, Presión máxima: 0,5 bar.

La estufa convencional se midió con el medidor etiquetado con el N° 4142074. Se carga el día 19 de abril; después de un día (el día 20 de abril) la estufa registró un consumo de 81 m³ de gas. Al finalizar el proceso de curado luego de 8 días, el contador registró un total de 710 m³ consumidos. La estufa mejorada se midió con el medidor etiquetado con el N° 4142077. Se cargó el día 21 de abril; después de un día la estufa registró un consumo de 48 m³ de gas. Casi al finalizar el proceso de curado luego de 6,5 días el contador registraba un total de 492 m³ consumidos. Los resultados obtenidos son muy promisorios ya que las medidas de consumo de gas representan un ahorro energético del orden del 30% y la disminución del tiempo de estufado en un día y medio. Se destaca que el primer día se evidenció un ahorro del 40% aproximadamente en el consumo, ambas estufas trabajaron en condiciones muy similares de temperatura ambiente y carga, con el termostato fijado en 34°C.

Tabla1: Consumo de gas comparativo entre la estufa testigo y la estufa mejorada.

	Estufa Convencional	Estufa Mejorada
N° de medidor	4142074.	4142077
Lapso aproximado del proceso	8 días	6,5 días
Gas Consumido el primer día (m ³)	81	48
Gas consumido al finalizar (m ³)	709	492

En la Tabla 2 se muestra un estudio comparativo contra la experiencia de Eckhardt (2002) donde se ha documentado por etapa de curado el consumo de una estufa bulk-curing que no tiene recuperación de calor del humo de combustión, como si lo tienen las más nuevas. El consumo es 0,91 m³/kg de tabaco curado, coincidente con la bibliografía que lo estima en 1 m³. En el caso de la estufa mejorada, utilizando las tasas de consumos de los ensayos, el consumo sería 0,26 m³/kg, lo que representa un ahorro energético del 70%.

También se compara contra los datos medidos por Altobelli (Altobelli *et al.*, 2013) con otra estufa convencional de construcción más nueva con recuperación de calor, donde se registró un consumo promedio de 0,59 m³/kg. En esa oportunidad se había realizado una pequeña mejora de la estufa al colocar aislamiento térmico en el suelo con bandejas de poliuretano expandido del tipo que se utilizan con almácigos y por encima una capa de cemento. Se había obtenido un mejora energética del 9% respecto a las estufas con suelo desnudo. El ahorro energético que produce la estufa mejorada respecto a esta estufa convencional es del 56%. En general, estos resultados son muy promisorios y más teniendo en cuenta que no se pudo ensayar el sistema de losa radiante, por lo que se espera mejorar el ahorro energético en los ensayos de la próxima campaña de estufado.

Tabla 2: Cuadro comparativo entre el consumo de la estufa mejorada

Etapa	Horas Etapa	Consumo Eckhardt (m3)	m³/h Mejorada	Consumo Mejorada	Ahorro
Amarrillamiento	45:30	111,09	1,14	52,16	53%
Fijación de color	5:30	17,41	1,34	7,40	57%
Secado de lámina	89:00	1266,30	3,32	295,60	76%
Secado de nervadura	24:00	246,1	4,91	117,91	52%
Total Consumo real	164	1640,90	2,88	473,08	

CONCLUSIONES

Se realizó la construcción de la estufa mejorada incorporando ganancia con radiación solar y mejorando la aislación térmica. El sistema permite mejorar la eficiencia térmica de la estufa de curado de tabaco tipo Bulk-Curing, disminuyendo el consumo de gas natural y reduciendo el tiempo de curado de tabaco Virginia, respecto de las estufas convencionales. Comparada contra una estufa testigo de similar construcción el ahorro energético que produce la estufa mejorada es del 30% y una reducción del tiempo del curado del 20%. Respecto de una estufa convencional de otro tipo de construcción con insuficiente aislamiento térmico y cuyo consumo es de 0,59 m³/kg el ahorro energético potencial es del 55%, y respecto a una estufa convencional sin recuperación de calor cuyo consumo es de 0,915 m³/kg, la mejora es del 70%

Las mejoras estructurales que se introdujeron son cinco: 1) se convierte el techo de la estufa en un precalentador solar de aire; 2) se mejora la transferencia térmica al aire en la unidad de calor incorporando un intercambiador del tipo banco de tubos y cambiando las tomas de aire para permitir ingreso de aire precalentado desde el techo de la estufa; 3) se incorpora calefacción térmica auxiliar al interior de la estufa mediante un sistema de losa radiante alimentada con un calentador solar de tubos y acumulador de agua, accionado en forma inteligente; 4) se realiza la recuperación de calor de las cañerías de salida de humo del quemador de gas, para precalentar el aire que ingresa a la unidad de calor de la estufa; 5) se incorpora aislación térmica en suelo, paredes perimetrales, se evitan puentes térmicos y filtraciones de aire en la estructura mediante mejora en la aislación térmica

El impacto en el sector industrial se vislumbra a través de un incremento en la calidad del producto final, la minimización del tiempo de curado y el consiguiente aumento del número de estufadas durante la campaña. También tendrá impacto en el ahorro energético con la consecuente disminución del gas consumido. Dada la crisis energética nacional, acciones en este sentido son muy importantes. Todo esto conlleva a la disminución de los costos de producción y a la mejora del precio de comercialización, brindando competitividad al sector.

REFERENCIAS

- Altobelli F., Condorí M., Díaz Russo G., Durán G. (2010). Estudio del desempeño energético de una estufa de secado de tabaco. Salta, Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 14, 07.41-07.48.
- Altobelli F., Condorí M., Durán G., Díaz Russo G. (2011). Determinación de pérdidas térmicas estructurales en estufas de tabaco tipo bulck-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.
- Dib Ashur H. (2013). Estimación y aplicación de huella de carbono en la producción tabacalera del Valle de Lerma, Salta. Tesina de grado, Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales.
- Eckhardt M. (2002). Las empresas transnacionales tabacaleras: Recuperación de una pasantía de pregrado universitario en una empresa en la provincia de Salta. Seminario de integración. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.
- Huang B. K., Bowers J. (1986). Development of greenhouse solar systems for bulk tobacco curing and plant production. *Energy in Agriculture*, 5, 267-284.
- Nobleza Piccardo S.A.I.C. y F. (2005). La importancia del tabaco para la Argentina y sus regiones. Salta Capital.
- Pope R. H. (2008). Demonstrator initiative for solar-assisted hybrid-energy source bulk tobacco curing barn. Tarboro NC: Eastern Carolina Manufacturing Company LLC.
- Rodríguez Faraldo M. A. y Zilocchi H. O. (2012). Historia del cultivo de tabaco en Salta. Salta Capital: Ministerio de agricultura ganadería y pesca.
- Salim Ruhul A. y Rafiq S. (2012). Why do some emerging economies proactively accelerate the adoption of renewable energy? *Energy economics* 34 (4): 1051 - 1057.
- Siddiqui K. M. (2001). Analysis of a Malakisi barn used for tobacco curing in East and Southern Africa. *Energy Conversion and Management*, 42(4), 483-490.
- Saravia L., Alanis E., Frigerio E., Castagnolo J., Fabris A. (1978). Secado solar del tabaco. Resultados experimentales. Actas de la 4° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar. La Plata, Buenos Aires.
- Saravia L., Frigerio E., Perez J., De Paul I., Gay M., Fernandez de Ulivarri D. (1979). Proyecto y ensayo de componentes de un secadero solar de tabaco Virginia. Actas de la 5° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar. Córdoba.
- Ulivarri D. F. (1990). El cultivo de los tabacos claros. Manual 1. Salta, Argentina.: Centro Regional Salta-Jujuy. Estación experimental Salta. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

ABSTRACT

The results obtained with the construction and test with a tobacco curing stove of the bulk-curing type are presented; it is improved with the inclusion of preheating air with solar energy, structural improves and thermal insulation. During several cured process was possible to record the consumption of natural gas. Compared with a witness stove of similar structure, the improved stove produces an energy saving of 30% and a diminution in the curing time of 20%. Regarding a conventional stove with insufficient thermal insulation and whose consumption is 0.59 m³/kg, the energy saving is 55%. Regarding a conventional stove without heat recovery whose consumption is 0.915 m³/kg, the energy saving is 70%.

Keywords: solar energy, energy save, tobacco stove, Virginia tobacco

PANORAMA ATUAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL E O PAPEL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO SETOR

Fabiano Perin Gasparin¹ e Alexandre José Bühler²

¹Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, UERGS e-mail: gasparin.fabiano@gmail.com

²Instituto Federal do Rio Grande do Sul, IFRS, Campus Farroupilha

Grupo de Pesquisa Aplicada em Energias Renováveis, GPAER

Tel. 55(54) 3260-2400 – e-mail: alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br

Recibido 10/08/18, aceptado 18/09/18

RESUMO. Desde o ano de 2012 o Brasil possui uma resolução normativa que permite o acesso a mini e microgeração distribuída. Essa resolução, que foi modificada em 2015 e, posteriormente em 2017 foi o marco regulatório para a geração distribuída no Brasil. Devido principalmente ao aumento na tarifa da energia, mas também a diminuição no custo da instalação de sistemas de geração distribuída, em especial os fotovoltaicos, o número de instalações saltou de apenas 2 no ano de 2012 para mais de 33.000 até o mês de julho de 2018. Este artigo faz revisão detalhada do panorama atual da geração distribuída no Brasil, apresentando dados referentes às fontes de energia presentes, número e potências de sistemas entre outras informações pertinentes aos pesquisadores da área de energias renováveis.

Palavras-chave: geração distribuída, sistemas fotovoltaicos, matriz energética.

INTRODUÇÃO

A geração distribuída (GD) é caracterizada pela inserção de fontes geradoras de energia elétrica diretamente na rede de distribuição. Existem algumas vantagens intrínsecas com potenciais benefícios ao sistema elétrico, entre os quais se destacam o adiamento de investimento na expansão dos sistemas de geração centralizada e dos sistemas de transmissão, menores perdas de energia entre a central geradora e o consumidor, baixo impacto ambiental e diversificação da matriz elétrica.

Com relação a matriz elétrica do Brasil apresentada na Fig. 1, existem hoje dois problemas principais. O primeiro deles é a grande dependência de uma única fonte de energia, no caso a hidroelétrica. Problemas na geração de energia por essa fonte, como grandes períodos de estiagem, por exemplo, podem ocasionar o aumento do uso das termoeletricas ou mesmo falta de energia para o consumidor. No caso do aumento do uso das termoeletricas, o preço da energia para o consumidor final pode aumentar consideravelmente, visto que o custo de geração do MWh de uma termoeletrica é superior ao de uma hidroelétrica. Já no ano de 2010 um estudo de Rüther e Zilles, (2010) apontava que a inserção de mais energia hidrelétrica na matriz elétrica brasileira causaria um inevitável aumento no custo da energia. Isso porque os custos de transmissão seriam mais altos, devido às maiores distâncias dos centros urbanos para os locais onde usinas de geração ainda podem ser instaladas. Além disso, com maiores distâncias, as perdas de energia na transmissão também aumentariam.

¹ Professor/Pesquisador UERGS

² Professor/Pesquisador IFRS

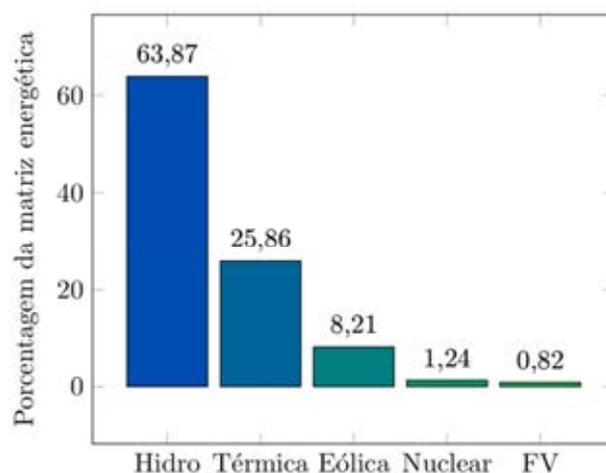


Figura 1 – Matriz elétrica do Brasil. Fonte: ANEEL, 2018^a

Do ponto de vista da geração de energia e diversificação da matriz elétrica brasileira, a importância da GD no Brasil é inquestionável, porém existem alguns desafios. Dentre as barreiras para a expansão da GD estão a maior complexidade que a elevada penetração de GD ocasiona no gerenciamento da distribuição de energia elétrica. As concessionárias de energia alegam perda de receita e dificuldades de controle da rede de distribuição, uma vez que a geração distribuída é normalmente formada por fontes intermitentes, sendo no Brasil composta majoritariamente por sistemas fotovoltaicos, como será posteriormente apresentado em detalhes.

Um fator importante que ainda limita o crescimento da GD no Brasil é a falta de linhas de financiamento com taxas atrativas, que deveriam estar disponíveis em todo o país. Como aponta um trabalho de Ferreira *et al.* (2018), uma das razões para as poucas alternativas oferecidas é a falta de conhecimento sobre a tecnologia pelo setor financeiro, que causa incertezas e dificuldades na avaliação correta dos riscos desses investimentos. Ainda assim, como este trabalho apresenta, a GD no Brasil cresceu fortemente nos últimos anos, quase que absolutamente impulsionada pela redução de custos dos sistemas fotovoltaicos conjugados com aumentos de tarifa de energia, que ocasionou a redução do tempo de retorno do investimento.

O crescimento mundial dos sistemas fotovoltaicos de aproveitamento da energia solar é um importante acontecimento no aumento da participação das energias renováveis na matriz elétrica mundial. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*) IEA (2018), ao final do ano de 2017, a capacidade mundial acumulada superou a potência de 400 GWp. Em 2017 foram adicionados ao menos 98 GWp em novas instalações fotovoltaicas, sendo que somente a China foi responsável pela adição de 58 GWp. O Brasil apareceu pela primeira vez entre os dez países que mais adicionaram sistemas fotovoltaicos de aproveitamento da energia solar à matriz elétrica, com 0,9 GWp instalados em 2017 e capacidade acumulada de 1,3 GWp.

Boa parte do expressivo crescimento dos sistemas fotovoltaicos no mundo, e não diferentemente no Brasil, é que estes possuem características que os tornam muito atrativos como fonte renovável de produção de eletricidade. Estes sistemas apresentam alta confiabilidade, baixos custos operacionais e de manutenção, não utilizam combustíveis e não geram resíduos durante a produção de eletricidade. Além disso, o aproveitamento da energia solar por meio de sistemas fotovoltaicos é extremamente modular, sendo possível a instalação de geração descentralizada, desde sistemas de poucos watts em um sistema isolado de eletrificação rural, por exemplo, até usinas com vários MW de potência. O tempo de instalação de novos empreendimentos também é relativamente reduzido em comparação com outras formas de produção de energia elétrica.

Apesar das inúmeras vantagens dos sistemas fotovoltaicos de aproveitamento da energia solar, trata-se de uma fonte intermitente de energia. A produção de eletricidade é dependente da disponibilidade de radiação solar e de suas variações diárias, sendo que a produção é nula durante a noite. Além da

intermitência, a energia produzida é dependente de fatores como inclinação dos módulos, acúmulo de sujeira, eficiências de conversão dos inversores, bem como das características físicas dos módulos fotovoltaicos, que tem sua potência reduzida com o aumento da temperatura.

Por outro lado, as características dos sistemas fotovoltaicos de conversão da energia solar os tornam muito atraente para geração distribuída, dada a facilidade de instalação nos telhados residenciais, alta modularidade, inversores confiáveis e conexão diretamente na instalação elétrica da unidade consumidora, tornando o cliente da concessionária de energia um consumidor e produtor de energia elétrica, termo que em inglês se popularizou como *prosumer*. As vantagens dos sistemas fotovoltaicos de aproveitamento da energia solar são tão grandes em comparação às outras possibilidades de fontes de energia, e o cenário atual é tão favorável, que a potência instalada fotovoltaica aumentou de apenas 0,01% da matriz elétrica brasileira em 2015 para cerca de 0,82% (cerca de 1,3 GWp) no momento em que este artigo é escrito. Esse aumento não era esperado por muitos pesquisadores da área, tal como aponta um trabalho de Holdermann *et al.* (2014), que não projetavam um incremento significativo dos sistemas fotovoltaicos no Brasil em um futuro próximo sem que houvesse um aumento dos incentivos para instalação dos sistemas.

De forma resumida, pode-se dizer que foram dois os grandes impulsionadores do crescimento do número de sistemas fotovoltaicos de aproveitamento da energia solar recentemente: os aumentos sucessivos no custo da energia elétrica da rede (que tornam mais atrativa a geração de energia pelo consumidor) e a mudança da resolução normativa nº 482 da Aneel em 2015 que alterou alguns pontos importantes na regulação da mini e microgeração distribuída. Entretanto, como aponta um trabalho de Faria Jr. (2017), para que a GD continue crescendo no país é muito importante que sejam implementadas estratégias avançadas de controle para auxiliar no funcionamento do sistema elétrico nacional.

O objetivo deste trabalho é apresentar a evolução e o panorama da geração distribuída no Brasil desde a publicação da resolução normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012). São avaliados os diversos aspectos dos sistemas de geração distribuída instalados no Brasil desde o ano de 2012 até julho de 2018, como número de instalações, potência típica e tipos de fonte de energia utilizadas pelos sistemas de GD.

METODOLOGIA

Neste artigo são salientados alguns pontos importantes do sistema de compensação de energia implantado no país para a mini e microgeração distribuída. Os dados oficiais disponíveis na página da agência nacional de energia elétrica (ANEEL, 2018^b) são compilados e analisados a fim de proporcionar um panorama da geração distribuída no país, bem como mostrar a evolução desde o ano de 2012 até o mês de julho de 2018.

Os dados disponíveis incluem o nome da distribuidora de energia, o código da unidade consumidora, o nome do titular da unidade consumidora, a classe de consumo (industrial, residencial, comercial, rural, poder público, iluminação pública), o subgrupo de consumo de acordo com as normas brasileiras, a modalidade de consumo (geração na própria unidade consumidora, autoconsumo remoto ou múltiplas unidades consumidoras repartindo créditos de energia), a quantidade de unidades consumidoras que recebem créditos de energia, o município e estado da unidade consumidora, a data de conexão, o tipo de geração (UFV: usina fotovoltaica, CGH: central geradora hidrelétrica, EOL: gerador eólico e UTE: usina termoeletrica), a fonte primária de energia e a potência nominal de cada sistema.

Os diversos aspectos do panorama da geração distribuída no Brasil apresentados incluem a evolução temporal do número de instalações e da potência instalada ao longo do tempo, os tipos de fonte de energia utilizados nas instalações de GD, a distribuição do número de instalações por intervalos de potência dos sistemas residenciais, comerciais e industriais, o número de instalações de cada modalidade de geração e a potência de cada modalidade. Estes dados são analisados a fim de ilustrar o panorama da geração distribuída e a importância do aproveitamento da energia solar por meio de sistemas fotovoltaicos no setor.

A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O marco regulatório da GD no Brasil foi a publicação da Resolução Normativa da ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, que *“Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.”* A resolução original foi modificada por outras resoluções posteriores, destacando-se a resolução normativa (RN) da ANEEL nº 517 de 11 de dezembro de 2012, a RN ANEEL nº 687 de 24 de novembro de 2015 e a RN da ANEEL nº 786 de 17 de outubro de 2017 (ANEEL, 2017). O histórico de modificações pode ser encontrado no texto da norma, disponível na página da ANEEL.

A microgeração distribuída compreende fontes geradoras com potência instalada igual ou menor a 75 kW, conectada diretamente na rede de distribuição por meio da unidade consumidora. As fontes permitidas incluem cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica. A minigeração distribuída compreende a instalação de geradores com potência superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW. As faixas de potência tiveram uma modificação importante na RN no limite superior da minigeração distribuída, que originalmente estava limitada a 1 MW. Outra modificação da redação foi a permissão geral do uso de fontes renováveis de energia, sem especificar ou limitar as fontes. O conceito de compensação de energia também está escrito na RN nº 482/2012, que o define como o *“sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa”*.

A versão atualizada da RN nº 482/2012 estabeleceu novas possibilidades de instalação de micro e minigeração distribuída, como em empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, possibilitando compartilhar os créditos de energia em um condomínio, por exemplo. Outra maneira permitida é a geração compartilhada, onde pode haver um consórcio ou cooperativa para compensação dos créditos de energia em unidades consumidoras diferentes daquela onde o sistema está instalado, desde que na mesma área de concessão da distribuidora. O autoconsumo remoto também é permitido, no caso em que o proprietário possuir outra unidade consumidora na mesma área de concessão onde está instalado o sistema. Assim, os créditos podem ser utilizados nesta unidade consumidora diferente.

Um aspecto técnico importante é que a potência instalada é limitada à potência disponibilizada para a unidade consumidora. Em sistemas residenciais (consumidores do grupo B, baixa tensão), a potência máxima que pode ser instalada (P_d) está associada ao produto da tensão no local (V) vezes a corrente suportada pelo disjuntor na entrada na residência (I) vezes o número de fases (N_f) e vezes o fator de potência (F_p), tal como apresenta a Eq. (1). Por exemplo, uma residência que possui um disjuntor de 30 A em 220 V trifásica com fator de potência de 0,92 não pode instalar um sistema gerador com mais de 18,216 kW de potência. Já nos sistemas industriais (consumidores do grupo A em média e alta tensão), o limite está associado a demanda contratada, expressa em kW.

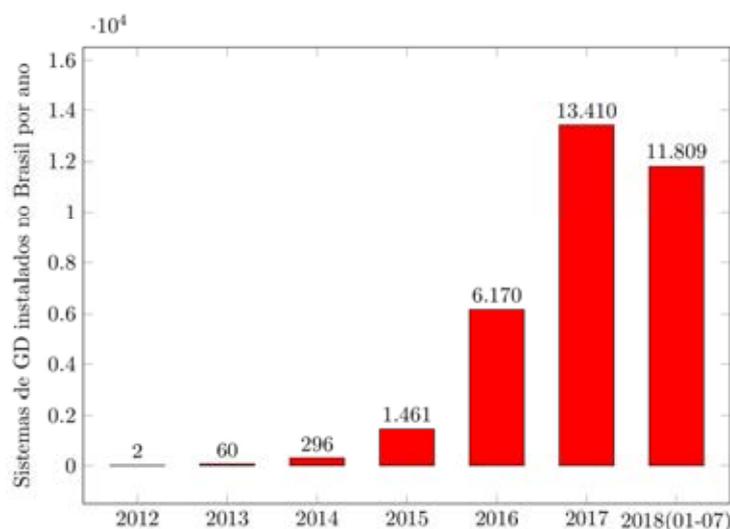
$$P_d = IVN_f F_p \quad (1)$$

Os créditos de energia têm validade de 60 meses, sendo que originalmente a resolução normativa estipulava apenas 36 meses de validade. A unidade consumidora com geração distribuída irá sempre pagar o custo de disponibilidade do sistema para consumidores do grupo B, ou a demanda contratada no caso do grupo A. Este é um aspecto que convém destacar, pois mesmo gerando um valor igual à energia consumida no mês, o consumidor ainda terá a cobrança desta taxa mínima na sua conta de energia. No caso do grupo B, a disponibilidade da rede é equivalente a um consumo mensal de 30 kWh para o sistema monofásico, 50 kWh para o sistema bifásico e 100 kWh para o sistema trifásico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados a seguir dados referentes à GD no Brasil do ano de 2012 ao ano de 2018. Em todos os casos analisados apresentados nesta seção, os dados referentes ao ano de 2018 correspondem ao período de janeiro a julho, mais especificamente de 1º de janeiro à 24 de julho.

No ano de 2012, quando a primeira versão da Resolução Normativa nº 482 foi lançada, havia apenas 2 sistemas em GD cadastrados junto a Aneel. Como já comentado neste trabalho, principalmente devido ao aumento no custo da energia da rede e também devido à redução no valor dos sistemas fotovoltaicos, o número de sistemas em GD tem crescido em uma taxa exponencial no Brasil. A Fig. 2 apresenta o número de sistemas instalados a cada ano e a Fig. 3 apresenta o acumulado de sistemas,



que até o momento em que este artigo é escrito ultrapassa 33.200 sistemas.

Figura 2 – Evolução do número de sistemas de geração distribuída instalados a cada ano no Brasil. A coluna 2018 (01-07) refere-se ao período de janeiro a 24 de julho de 2018.

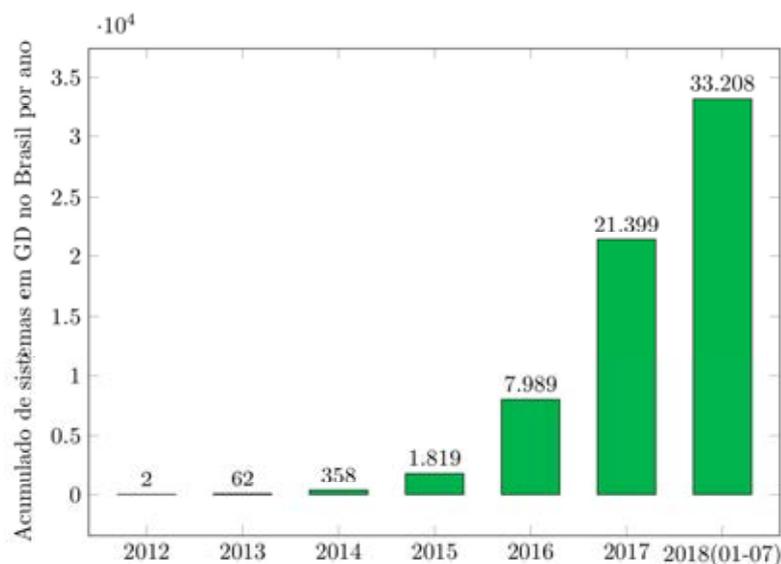


Figura 3 – Evolução do número de sistemas de geração distribuída acumulados ao longo do tempo no Brasil. A coluna 2018 (01-07) inclui os sistemas adicionados entre janeiro a 24 de julho de 2018.

As Fig. 4 apresenta a potência instalada em GD a cada ano, enquanto que a Fig. 5 apresenta a potência acumulada. É importante ressaltar que, os dados referem-se a todas as fontes de energia em GD, porém este aumento significativo que se observa é praticamente devido unicamente a sistemas fotovoltaicos de aproveitamento da energia solar, já que esta representa cerca de 99% da GD no Brasil, como será explanado adiante. Outro fato interessante é que a potência instalada em 7 meses no ano de 2018 já está próxima da potência total instalada em 2017.

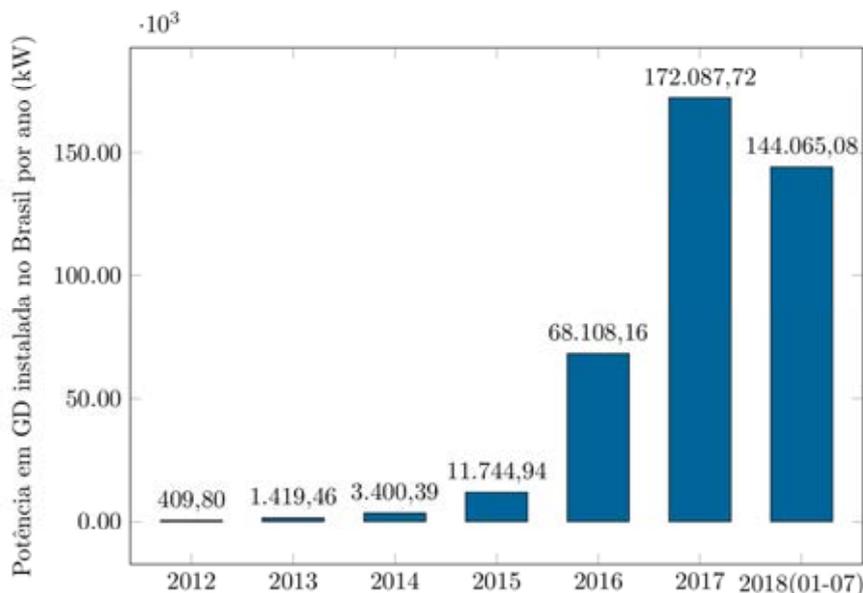


Figura 4 – Evolução da potência nominal adicionada a cada ano em sistemas de geração distribuída instalados no Brasil. A coluna 2018 (01-07) refere-se ao período de janeiro a 24 de julho de 2018.

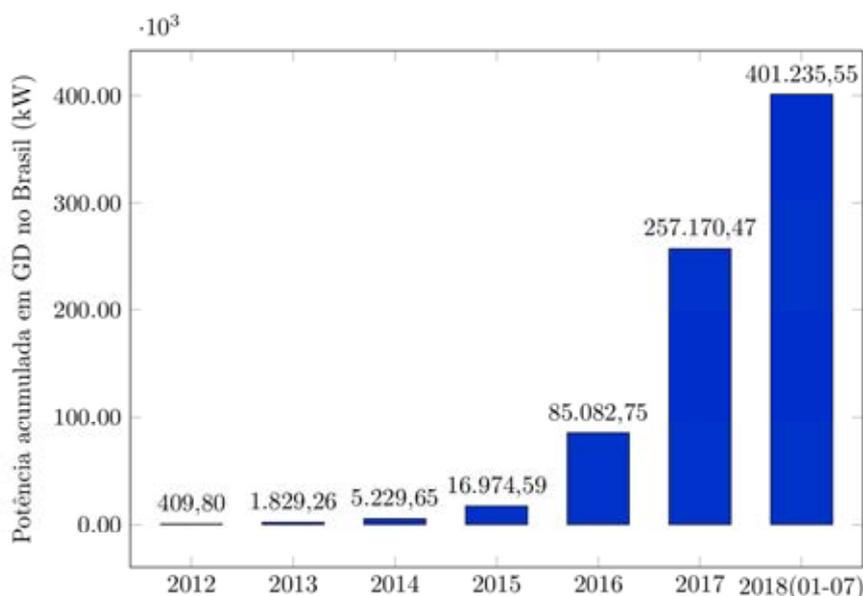


Figura 5 – Capacidade acumulada de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída no Brasil ao longo do tempo. A coluna 2018 (01-07) inclui os sistemas adicionados entre janeiro a 24 de julho de 2018.

As Fig. 6 a 9 apresentam histogramas de distribuição de potência para os sistemas existentes no Brasil. São apresentados quatro casos descritos a seguir: Fig. 6 – para todos os sistemas em GD; Fig. 7 – para

sistemas residenciais; Fig. 8 – sistemas comerciais e Fig. 9 – sistemas industriais. Quando se analisa todos os sistemas, nota-se que o maior número de instalações corresponde a uma faixa de potência de 3 a 5 kW, mesma situação que se observa nos sistemas residenciais. Isso se explica pelo fato de a grande maioria dos sistemas em GD no Brasil serem residenciais, como apresentado na Fig. 10. Já no caso dos sistemas comerciais e industriais, o maior número de instalações está na faixa de potência entre 20 e 50 kW.

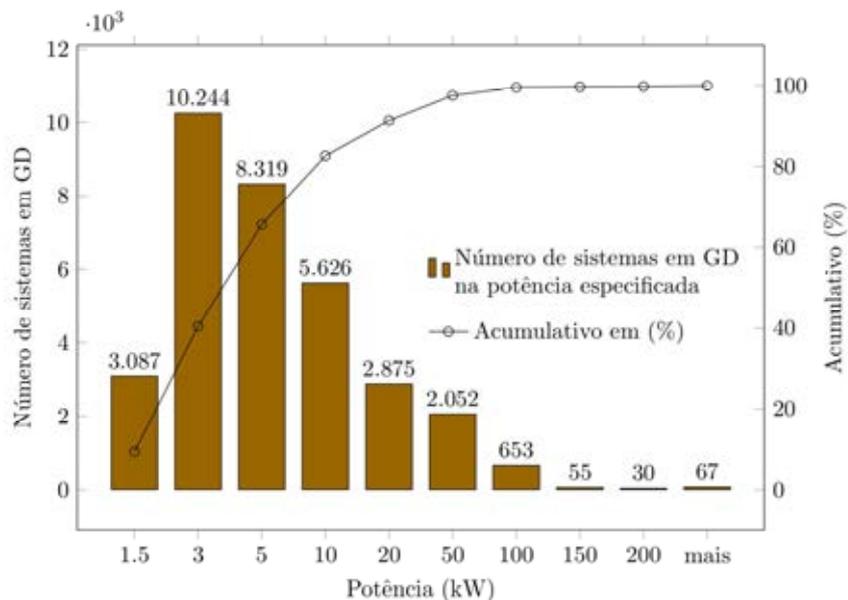


Figura 6 – Distribuição das potências de todos os sistemas de GD instalados no Brasil até o mês de julho de 2018.

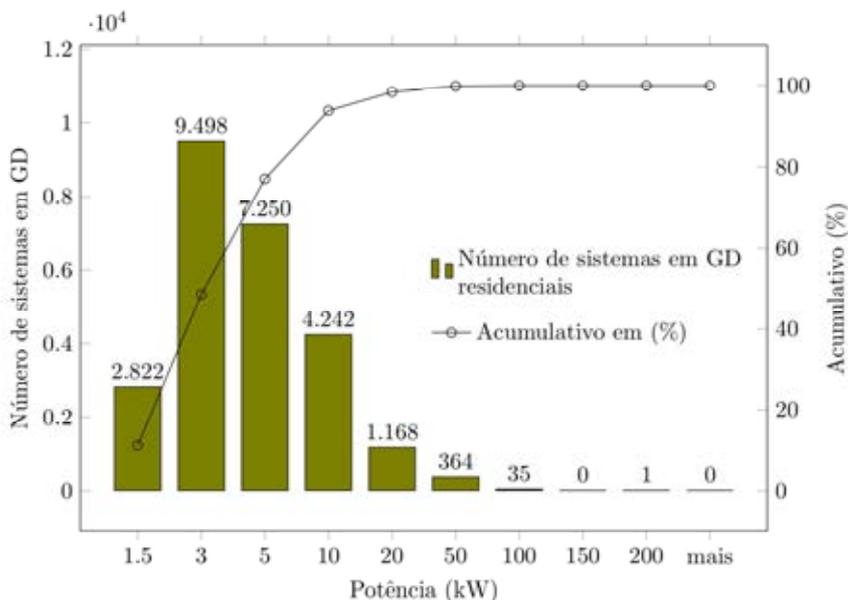


Figura 7 – Distribuição de frequência das potências dos sistemas de GD instalados em residências no Brasil até o mês de julho de 2018.

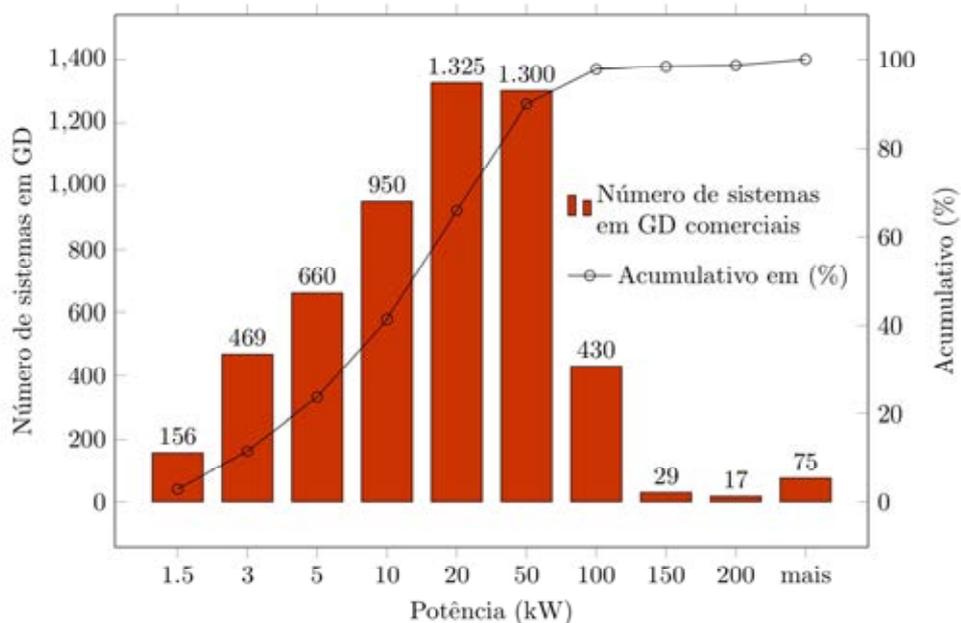


Figura 8–Distribuição de frequência das potências dos sistemas de GD instalados em unidades consumidoras comerciais no Brasil até o mês de julho de 2018.

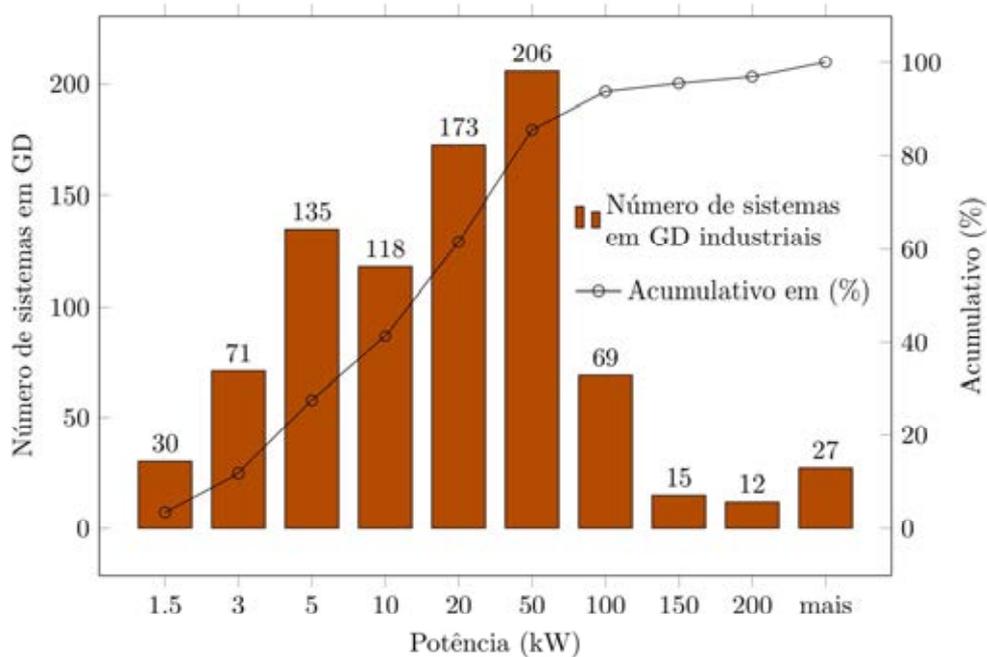


Figura 9–Distribuição de frequência das potências dos sistemas de GD instalados em unidades consumidoras industriais no Brasil até o mês de julho de 2018.

A Fig. 10 apresenta o número de sistemas em função da classe de consumo. A maior parte compreende os sistemas residenciais, com 25.380 sistemas cadastrados na Aneel, seguido pelos sistemas comerciais, com 5411 unidades. Embora os sistemas residenciais sejam mais numerosos, devido as suas potências típicas baixas, a potência total residencial é cerca de 63% inferior à dos sistemas comerciais, conforme mostra a Fig. 11.

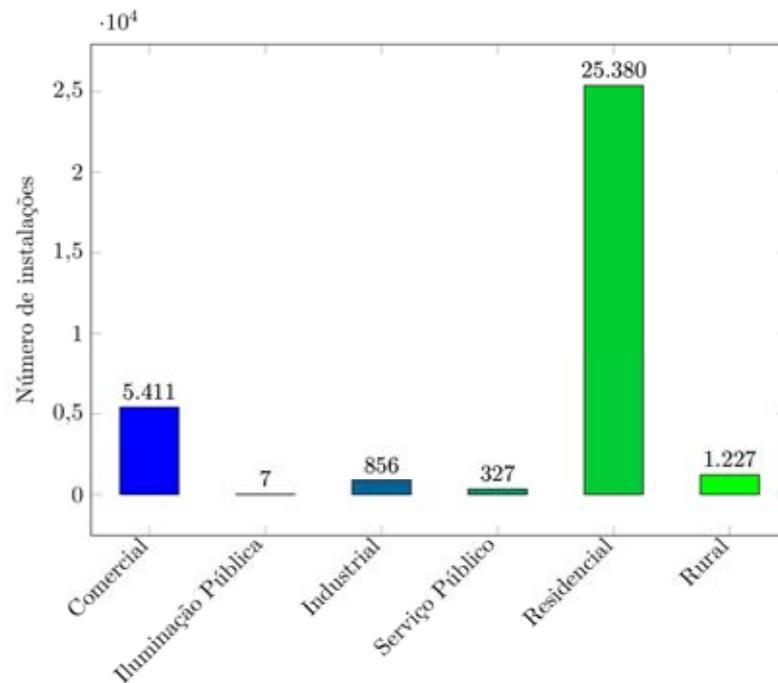


Figura 10 - Número total de sistemas em GD até julho de 2018 no Brasil por classe de consumo.

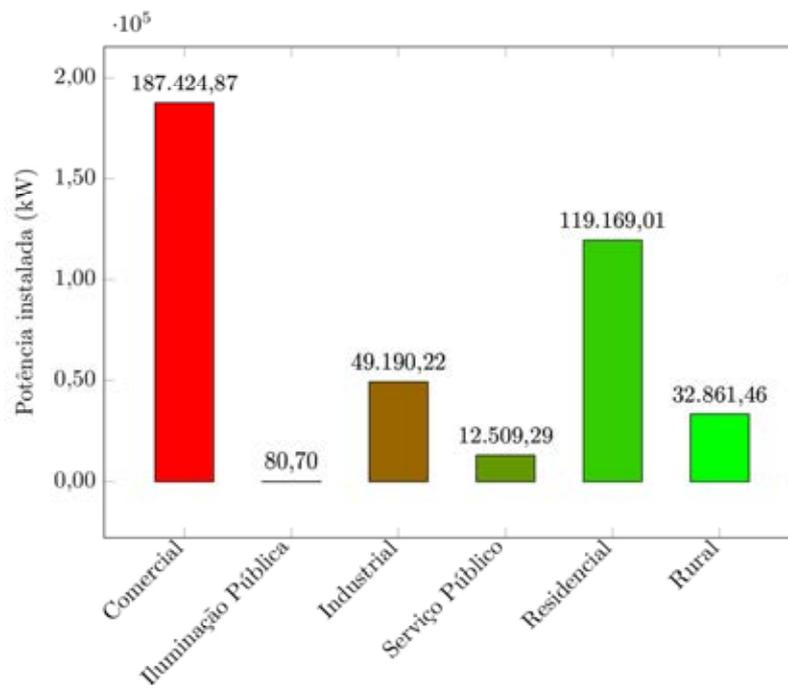


Figura 11 - Potências dos sistemas em GD instalados até julho de 2018 no Brasil por classe de consumo.

Com relação às diferentes fontes de energia presentes na GD brasileira, tal como mostra a Fig. 12, a imensa maioria é relativa a sistemas fotovoltaicos de geração. Somando todas as outras fontes de geração, a representação é de somente 0,6% do total, ou seja, a fotovoltaica corresponde a 99,4% da GD no Brasil. Entretanto, quando se analisa a participação em potência das diferentes fontes de energia (Fig. 13) a participação da fotovoltaica cai para 73% do total. Isso ocorre principalmente

devido as centrais geradoras hidrelétricas, que com 50 unidades somam uma potência de quase 45 MW.

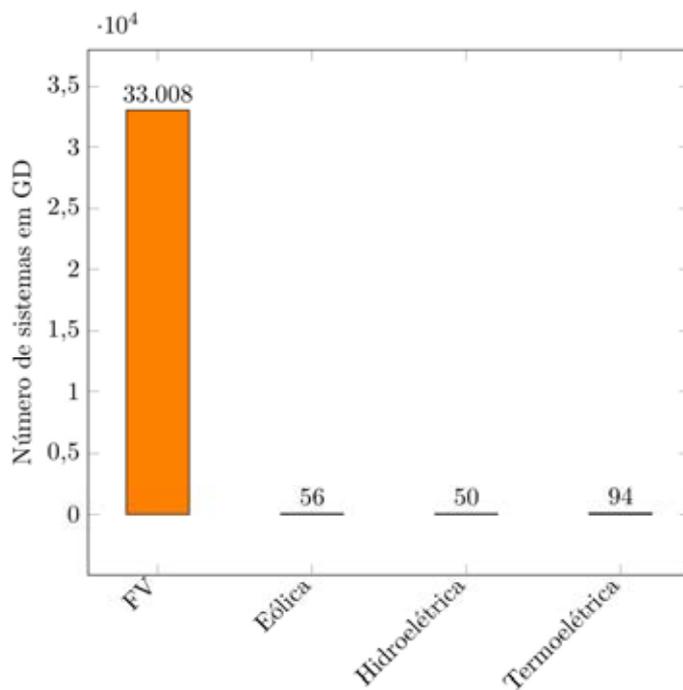


Figura 12 – Número de sistemas em GD instalados até julho de 2018 no Brasil por tipo de geração.

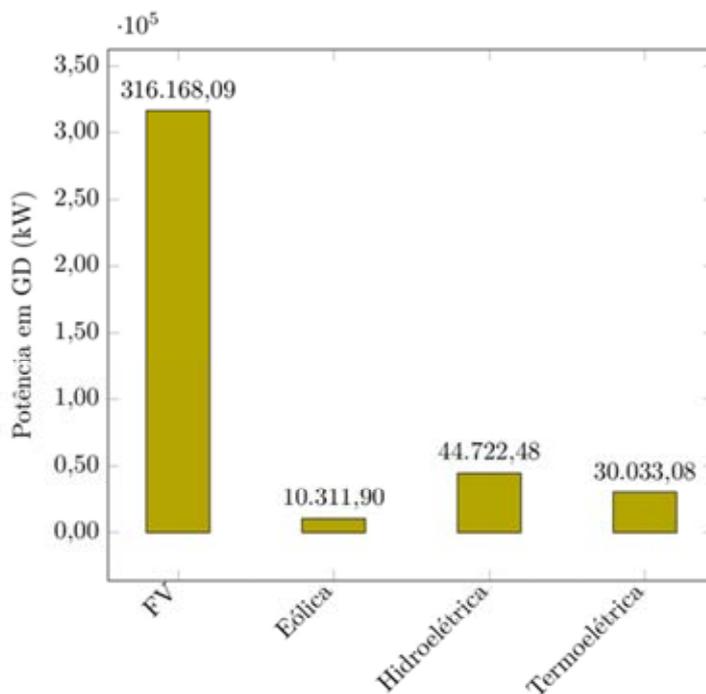


Figura 13 – Potência dos sistemas em GD instalados até julho de 2018 no Brasil por tipo de geração.

CONCLUSÕES

A geração distribuída carecia de legislação no Brasil até a publicação da resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL, sendo que no ano da publicação foram registradas apenas 2 unidades junto a Aneel. Atualmente a geração distribuída é foco de interesse de pesquisadores e do setor comercial, somando mais de 33.000 unidades cadastradas até meados de 2018. Seguindo a tendência atual de aumento no valor da tarifa de energia da rede, diminuição no custo dos sistemas de geração e maior oferta de linhas de crédito para este setor, a GD deve continuar seu crescimento acelerado ao menos no futuro próximo.

Existem hoje milhares de empresas no Brasil que oferecem o serviço de projeto e instalação de sistemas fotovoltaicos, representantes atualmente de mais de 99% da GD instalada no Brasil. Todo este setor tem se mantido aquecido, mesmo nos dois últimos anos em que o país passa por uma crise econômica.

Muitos trabalhos apontam para a necessidade de fomentar a industrialização da cadeia da energia solar fotovoltaica no Brasil, como forma de incentivar seu crescimento no país. Entretanto, o que se tem observado é que, ao menos no curto prazo as barreiras mais fortes para o crescimento são a ainda baixa oferta de linhas de crédito específicas e ainda insuficiente divulgação da tecnologia entre os consumidores e possíveis investidores.

Por fim, embora não seja possível a venda de energia para a concessionária pelo consumidor, o sistema de compensação de créditos tem se mostrado efetivo e confiável. A grande incerteza hoje para com as concessionárias reside na questão da tributação sobre a energia gerada. Atualmente a maioria das concessionárias de energia só tarifam o que é consumido da rede, porém existe a possibilidade dessa situação ser alterada no futuro, o que acarretaria e tempos de retorno mais longos para os investidores em sistemas de geração, tornando esses sistemas menos atrativos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2012). RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012, disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2017). RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 786, DE 17 DE OUTUBRO DE 2012, disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2018^a). Banco de informação de Geração. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2018^b). Geração distribuída. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>
- Faria Jr., H., Trigo, F. B. M. e Cavalcanti, J. A. M. (2017). Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, pp. 469-475.
- Ferreira, A., Kunh, S. S., Fagnani, K. C., De Souza, T. A., Tonezer, C., Dos Santos, G. C. e Coimbra-Araújo, C. H. (2018). Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp. 181-191.
- Holdermann, C., Kissel, K. e Beigel, J. (2014). Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy*, 67, pp. 612-617
- IEA – International Energy Agency (2018). SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS Report IEA PVPS T1-33:2018.
- Rüther, R. e Zilles, R. (2010). Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. *Energy Policy*, 39, 3, pp. 1027-1030.

CURRENT PANORAMA OF THE DISTRIBUTED GENERATION IN BRAZIL AND THE ROLE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY IN THE SECTOR

ABSTRACT. *Since 2012 the Normative Resolution ANEEL 482 allows the grid connection of mini and micro generation. The resolution was modified in 2015 and lately in 2017, being the framework of the Distributed Generation (DG) in Brazil. The number of DG system has strongly increased in Brazil from only 2 systems in 2012 for more than 33.000 at the moment this paper is being written. The increase has happened mainly due to two factors: the continuous increase of electricity cost from the grid and the decrease of the PV system cost along the last years. This work has as purpose perform a detailed review of the current panorama of the DG in Brazil showing data regarding the different sources of energy presented in the DG, amount and typical power of the systems among other pertinent information.*

Keywords. *Distributed generation, Photovoltaic systems, Energy matrix*

LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES: UN ESTUDIO DE PERCEPCION SOCIAL Y VALIDACION SOCIAL DEL MODELO DE PLANIFICACION ENERGÉTICA DE CINCO DIMENSIONES

Cruz I¹, Sauad J² y M. Condori³

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO)
Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED)- Universidad Nacional de Salta
C.P. 4400 – Salta
Tel. 0387-4258709 – Fax 0387-4255489
e-mail: icruz.unsa@gmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 21/09/18

RESUMEN: La percepción social que poseen los tomadores de decisiones y expertos en planificación energética sobre: la energía, modelos de planificación energética y sustentabilidad, condiciona las políticas de intervención en el territorio y la sostenibilidad social de la implementación de energías renovables. En este estudio se analizan dichas perspectivas y se valida el modelo conceptual de PE de cinco dimensiones (PE 5D), aplicando la metodología Q. Se encontraron cuatro perspectivas sociales (participativos, técnicos, económicos y protectores), que evidencian que el recurso energético es un recurso común y el acceso a la energía un derecho humano. Se concluye que: el modelo de PE 5D cuenta con validez social, el modelo de sustentabilidad tradicional se encuentra obsoleto y que el modelo energético actual constituye un problema ecológico distributivo. Las energías renovables poseen potencial para cambiar el escenario actual.

Palabras clave: planificación energética, sustentabilidad, metodología Q, percepción social, energías renovables.

INTRODUCCION

Existen numerosos estudios sobre implementación de Energías Renovables (ER) como estrategia de Planificación Energética (PE) (Lund, 2010; Krajačić et al., 2011; Alberg y Lung, 2011, Tsoutsos et al., 2009; Haralambopoulos y Polatidis; 2003; Pohekar y Ramachandran; 2004, Quijano, 2012, Ramachandra, 2009, Rodriguez, 2012). La literatura evidencia que si el territorio posee recursos energéticos renovables, la sustentabilidad de las políticas energéticas depende principalmente de la viabilidad social y económica de las estrategias de implementación de ER (Wolsink, 2007; Painuly., 2001; Reddy y Painuly, 2004). Los problemas de aceptación social y de existencia de una alta percepción de riesgo de las tecnologías renovables han sido conceptualizados en el ámbito de la PE, como barreras sociales. En tanto que, la aceptación social de las ER se ha conceptualizado como sustentabilidad social. Para mejorar la implementación de ER, Batel y Devine (2014) proponen estudiar en profundidad la barrera social y la aceptación social de las ER, a partir del abordaje de los aspectos socio-psicológicos de los actores. Los estudios actuales han focalizado el análisis en los puntos de vista de los ciudadanos, sin considerar la perspectiva de los tomadores de decisiones y expertos de PE.

La forma en la que tomadores de decisiones y expertos en PE perciben los problemas socio ambientales condiciona las políticas de intervención en el territorio (Barry y Proops, 1999; Addams y Proops, 2000). En tanto que, los modelos conceptuales de PE, son consecuencia de la percepción que los actores tienen sobre el recurso energético y el Sistema Socio Ecológico (SSE). El estudio de la percepción social de los tomadores de decisiones y expertos en PE puede contribuir a entender las

¹ Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO)- Universidad Nacional de Salta

² Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED)- Universidad Nacional de Salta

³ Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO)- Universidad Nacional de Salta

estrategias de intervención en el territorio. Permitiendo identificar puntos críticos para mejorar la sustentabilidad social de los proyectos de ER.

Una forma de explorar la naturaleza de la percepción social de los modelos de PE existentes y validar nuevos modelos de PE, es aplicar la Metodología Q (Webler y Tuler, 2009). McKeown & Thomas (1988) y Barry y Proops (1999), expresan que los puntos de vista o formas de mirar el SSE, pueden conceptualizarse como subjetividad y se expresan mediante discursos. El análisis riguroso de estos discursos permite identificar perspectivas sociales sobre la PE y exponer el marco conceptual que subyace a los procesos de toma de decisiones.

Atendiendo a la relevancia de la relación bidireccional entre los discursos y las estrategias PE, en este estudio se analizan las perspectivas sociales de los tomadores de decisión y expertos de PE respecto a la conceptualización de la energía, la sustentabilidad y se valida el modelo conceptual de PE de Cinco Dimensiones (PE 5D).

EL MODELO DE PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA DE CINCO DIMENSIONES

El PE 5D consiste en una adaptación del modelo de sustentabilidad de cinco dimensiones desarrollado por Seghezzi (2009). La PE 5D es un proceso complejo de definición de políticas a largo plazo, que se encuentra inserto en un SSE multiactor y multiobjetivo. Es un problema de optimización con restricciones técnicas, económicas y sociales, tendiente a la construcción de políticas de energización sustentable (a largo plazo). Compatibiliza las perspectivas sociales y la participación de los actores del territorio con los aspectos científicos y técnicos, para la toma de decisiones. Una descripción más detallada del modelo e indicadores de la PE 5D puede consultarse en Cruz y otros (2015).

El proceso de PE 5D se desarrolla con el fin de mitigar los conflictos ecológicos distributivos (Martínez-Alier, 1997, 2016) del modelo energético actual. Por lo cual, las acciones estratégicas se desarrollan para reducir las asimetrías o desigualdades sociales, espaciales y temporales del uso de los recursos energéticos, los servicios ambientales y cargas de contaminación. Los recursos energéticos se entienden como recursos comunes y el acceso a la energía como derecho humano.

En la PE 5D, las estrategias de implementación de ER se analizan para las cinco dimensiones de la sustentabilidad: sociedad, economía, ambiente, persona y permanencia. La dimensión sociedad se aborda a partir de módulos homogéneos de consumo (o sin acceso a la energía), conceptualizados como un colectivo social con un número definido y diferenciado de actores que comparten características, necesidades, intereses y que poseen una cosmovisión particular de su realidad. El módulo homogéneo puede surgir del análisis de variables socioeconómicas o por una autodefinición de los grupos sociales. La dimensión economía implica evaluar las estrategias de implementación de ER mediante evaluación financiera y económica, incluyendo en el análisis las externalidades del modelo energético. La dimensión ambiente se evalúa sobre el sistema biofísico, estimando el impacto de las estrategias de PE a nivel local mediante síntesis emergética y a nivel global a través de la huella de carbono. La dimensión persona implica el estudio de la percepción social de los actores sobre: 1) factores de contexto implicados en la sustitución de energía, 2) las características del sistema tecnológico a implementar y 3) mecanismos potenciales de implementación de la ER (aspectos de procedimiento de la PE). La dimensión permanencia consiste en el análisis de la evolución temporal y espacial del SSE con las alternativas de PE, permitiendo estimar los impactos sobre el resto de las dimensiones y ajustar las metas.

METODOLOGÍA

La Metodología Q es un “conjunto de principios psicométricos y operacionales combinados con aplicaciones estadísticas especializadas que permiten un análisis sistemático y riguroso de la subjetividad humana” (McKeown y Thomas, 1988). Proporciona una base para el estudio del punto de vista de una persona, opinión, creencias y actitudes (Brown, 1993). Consiste en el análisis de declaraciones agrupadas en categorías o temas de análisis, las cuales son ordenadas por los actores en una grilla de distribución normal (Q sort). Por medio del ordenamiento del conjunto de declaraciones según la cosmovisión de cada actor (Van Exel y De Graaf, 2005), las personas dan su significado subjetivo de la situación, y al hacerlo, ponen de manifiesto su punto de vista o un perfil personal (Brown, 1996). Las etapas de la metodología son: concurre, Q sort, Q set, Q sort y Q análisis.

La fase de concourse consiste en la definición de los temas o categorías que reflejan los ejes nodales del estudio. En este trabajo, concourse se definió en base a textos científicos, experiencias de PE reportadas en la literatura y consulta a expertos en la temática mediante entrevistas abiertas. Se abordaron categorías conceptuales de la percepción de la energía (como bien de mercado, recurso común y servicio público), suficiencia del paradigma de la sustentabilidad tradicional para abordar la PE y aspectos del modelo de PE 5D. Las categorías referidas a la validación social del modelo de PE 5D son las siguientes:

Dimensión Sociedad: para planificar es necesario identificar el componente social y definir unidades operativas, se propuso a los actores tres posturas:

- i) El componente social puede conceptualizarse como módulo homogéneo de consumo de energía, entendido como un colectivo social definido con una cosmovisión de la energía y de su SSE producto de su contexto espacio-temporal (modelo de PE 5D).
- ii) El componente social es tan heterogéneo que resulta imposible encontrar comunalidades entre los sectores sociales. No es posible aplicar el concepto de módulos homogéneos.
- iii) El componente social es un conjunto de usuarios potenciales de consumo energético y/o conjunto de clientes con acceso a la energía.

Dimensión Economía: en general los aspectos financieros y económicos, se toman como equivalentes en la literatura y experiencias de PE. Desde la perspectiva de la PE 5D ambos criterios difieren. Se plantearon las siguientes posturas:

- i. La evaluación financiera es suficiente para formular políticas energéticas. El acceso a la energía, los mecanismos de reducción de consumo, eficiencia energética y mecanismos de promoción de las ER deben regularse mediante mecanismos vía precios.
- ii. Además de la evaluación financiera, es necesario incluir la evaluación económica, incorporando el costo social y la distribución de los beneficios y costos sociales. Desde esta perspectiva, corresponde implementar instrumentos económicos de gestión ambiental para promover el acceso a la energía con un enfoque de equidad social (Modelo de PE 5D).

Dimensión Ambiente: los indicadores empleados para la evaluación de la subdimensión ambiente reflejan la relevancia que les actores le otorgan a los impactos de la PE a escala local y global. Se consideraron las siguientes posturas:

- i) El uso de la huella de carbono es suficiente para evaluar el impacto de la PE. Los impactos ambientales locales de la sustitución energética, quedan subyugados a los efectos de la PE a nivel global.
- ii) El uso de la síntesis energética se emplea para estimar el impacto local y la huella de carbono para cuantificar el impacto global.

Dimensión Permanencia: se incorpora el componente temporal del SSE como eje transversal de análisis. Ello implica seguir la evolución del SSE en el tiempo y espacio. Se consideraron las siguientes posturas:

- i) No es necesario incluir la dimensión permanencia en la PE, ya que el seguimiento de la evolución espacial y temporal del SSE no es relevante. Es suficiente analizar la situación actual y deseada. El mapeo de la situación actual es importante pero no el mapeo de la situación deseada.
- ii) La dimensión permanencia emerge como una nueva dimensión de la PE, ya que resulta relevante seguir la trayectoria temporal y espacial de los impactos. Los impactos (deseados y no deseados) deben evaluarse antes, durante y al finalizar el proceso de PE. A la vez que, debe realizarse un mapeo del SSE de la situación actual y deseada.

Dimensión Persona: la percepción social de los actores emerge como una nueva dimensión de la PE.

La selección de las declaraciones, fase Q set, se realizó en base entrevistas semiestructuradas, recopilación de antecedentes, declaraciones obtenidas en medios de comunicación, información de artículos de revistas de investigación y experiencias de PE. Se seleccionaron 65 afirmaciones, en las que se redujo al mínimo la carga cognitiva manteniendo el “exceso de significado” (Webler et al., 2009).

Los Participantes Q seleccionados para este estudio de caso (P set), constituyen una muestra estructurada, que contiene un amplio rango de opiniones sobre la temática analizada (Webler et al., 2009). Se optó por tres perfiles: i) expertos en el área de PE, sustentabilidad, energía solar, formulación y evaluación de proyectos y transferencia de tecnología, ii) personas con experiencia en la planificación y gestión de la energía, pertenecientes a organismos gubernamentales y no gubernamentales, y iii) estudiantes de carreras vinculadas a la PE e implementación sustentable de ES. La muestra se conformó con 24 participantes Q, conforme al criterio definido por Webler et al. (2009) que sugiere una relación 3:1, entre el número de afirmaciones y participantes.

El proceso de ordenamiento de las afirmaciones, Q sort, se presentó a los participantes en formato on-line denominado Plataforma Q (<http://170.210.201.158/Qyan>). Dicha plataforma fue programada con software open-source (LINUX - APACHE - PHP - MYSQL - CodeIgniter - JQuery-NetBeans) y desarrollada específicamente para este estudio por el grupo de Investigadores de Perspectivas Sociales del INENCO (<http://170.210.201.158/Q2/index.php/afirmacion/quienes>) y validada por expertos en el área. El formato on-line permite ampliar el espectro geográfico de los participantes reduciendo al mínimo los recursos y el tiempo que los actores destinan a completar el proceso de ordenamiento (Reber et al., 2000). Los participantes Q ordenaron las 65 afirmaciones en una grilla de distribución cuasi normal con 11 categorías (-5 a 5) (Figura 1) (Webler, 2009).

Durante la fase de Q análisis se efectuó un Análisis de Componentes Principales (ACP) comparando los diversos Q sort de los participantes Q. Se empleó el software PQ Method 2.20 (<http://schmolck.org/qmethod/>).

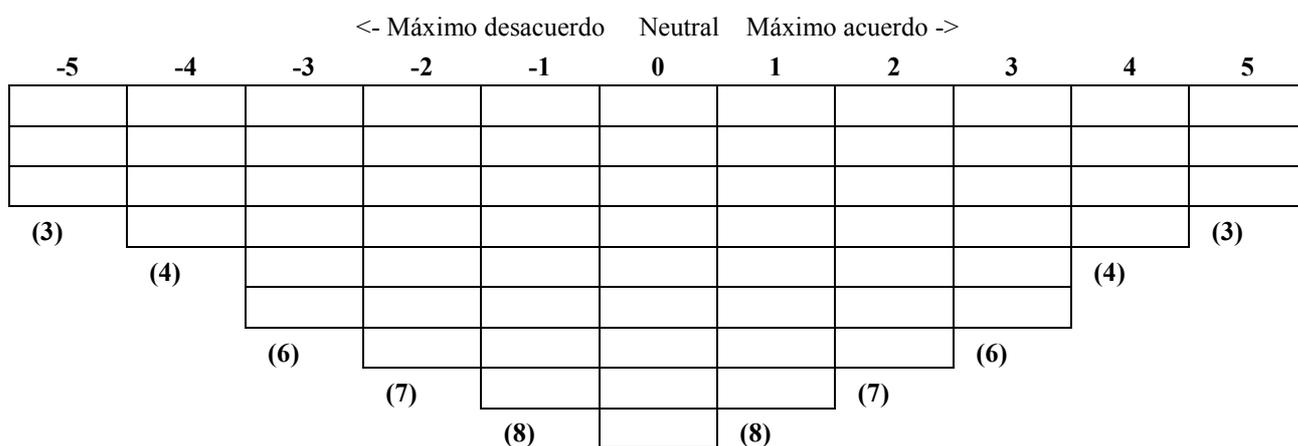


Figura 1. Distribución cuasi-normal

RESULTADOS

El estudio de las perspectivas individuales permitió identificar cuatro factores significativos, que corresponden a cuatro perspectivas sociales distintas. Las perspectivas cumplen con la condición de Webler (2009) de poseer valores propios superiores a 1, explicando un 60% de la varianza acumulada. La matriz de correlación de factores (Tabla1), evidencia que no existe una relación estadísticamente significativa entre los factores, por lo cual las posturas sociales identificadas pueden considerarse como diferentes.

Tabla1. Matriz de correlación.

Factores	A	B	C	D
A	1,0000	0,5546	0,4958	0,6727
B	0,5546	1,0000	0,3604	0,4691
C	0,4958	0,3604	1,0000	0,4166
D	0,6727	0,4691	0,4166	1,0000

Los cuatro factores identificados constituyen patrones coherentes y diferenciados de opinión sobre las temáticas objeto de estudio, representan una ideología plasmada en el ordenamiento de las afirmaciones en la grilla por parte de los participantes. En la Tabla 2 presenta la matriz de factores, con

las afirmaciones distintivas correspondientes (nivel de confianza de 95% ($p < 0,05$) y del 99% ($p < 0,01$)). Cada perspectiva social (factor) fue descrito de acuerdo a las afirmaciones estadísticamente significativas, la carga de la afirmación sobre el factor, la distribución o “grilla ideal” y entrevistas semiestructuradas.

Factor A: Los participativos

El factor se encuentra conformado por un grupo heterogéneo de 11 participantes Q: profesionales de organismos públicos, privados encargados de planificar y gestionar la energía, expertos del área de planificación energética, desarrollo tecnológico de ES, políticas públicas, formulación y evaluación de proyectos y adecuación socio-técnica de tecnologías para la inclusión social.

Esta perspectiva social se caracteriza por conceptualizar al acceso a la energía como un servicio público y considerar que el precio de mercado del recurso energético es inadecuado ya que no refleja el verdadero costo de producción de la energía. Se oponen al liberalismo económico para la gestión de la energía.

Los actores concuerdan en que la aplicación del concepto de sustentabilidad tradicional resulta limitado. Sostienen que la cosmovisión de los actores, respecto a la energía y la utilidad de los sistemas tecnológicos para resolver sus problemas, es tan importante que debe constituirse como un eje más de la PE (Dimensión Persona).

Los participantes Q coinciden en la necesidad de abordar el proceso mediante un indicador que permita integrar las dimensiones economía y sociedad a partir de la aplicación del método de síntesis energética. Piensan que es necesario incorporar las externalidades del sistema energético, a partir de la evaluación económica.

Los actores manifestaron una postura neutral respecto a la inclusión de la variable temporal como una dimensión adicional de la PE. No obstante consideran que si bien el diagnóstico del escenario actual resulta relevante, los impactos de la PE deben evaluarse ex ante y post. A la vez que debe implementarse un monitoreo de las estrategias de PE.

Factor B: Los técnicos

Esa perspectiva social estuvo representada por cinco participantes Q, cuyo perfil es académico de investigación en desarrollo tecnológico e implementación de energía solar. Los dos miembros de organismos públicos que se encuentran dentro de este factor, son responsables de la planificación y gestión de la energía, expertos en la modelación de escenarios prospectivos de sustitución energética.

En base a la grilla ideal de estos factores se evidencia que los actores consideran que existe un umbral mínimo de consumo energético, que debería ser considerado como derecho humano. Se oponen a la concepción de la energía como bien de mercado y como servicio público. Los actores sostienen que es prioritario generar oportunidades de negocios para los inversionistas de energías renovables.

Las dimensiones de la sustentabilidad tradicional resultan insuficientes. El aspecto técnico (estimación del potencial del recurso, selección de tecnología, etc.) debe constituirse como una dimensión de PE para la PE. Para el factor B la huella de carbono es un indicador suficiente para evaluar el impacto ambiental de un proceso de PE. Los actores no son concluyentes sobre la inclusión de la dimensión permanencia, pero destacan la necesidad de modelar los impactos de la PE ex ante y seguir su evolución temporal y espacial.

Factor C: Los económicos

Esta perspectiva se encuentra conformada por un investigador experto en desarrollo tecnológico de ES y un miembro de un organismo público nacional que se desempeña en el área evaluación de impacto ambiental energético.

La conceptualización de la energía no es concluyente. El factor C está en desacuerdo con la concepción de la energía como bien de mercado, aun cuando se supere el umbral mínimo de consumo

que garantiza la supervivencia y el bienestar de las personas. Presentan una postura neutral a la concepción de la energía como un servicio público.

El componente social se interpreta como clientes o potenciales clientes. Desde este enfoque, el proceso de toma de decisiones debe basarse en un análisis costo beneficio. La dimensión ambiental puede abordarse desde la perspectiva de la responsabilidad social empresarial. Consideran que si bien es importante tener en cuenta la percepción de las personas, este aspecto no puede emerger como una dimensión más de la sustentabilidad. Este grupo de actores considera que es más importante el diagnóstico que realizar una evaluación ex ante y ex post de la PE, e implementar un proceso de monitoreo continuo.

Factor D: Los protectores

El factor D se encuentra constituido por un grupo heterogéneo de 6 participantes Q: expertos en PE e implementación de ER (pertenecientes a organismos nacionales e internacionales), un planificador y gestor de ER (organismo público nacional), un experto en modelado prospectivo, un investigador experto en desarrollo tecnológico de ES y un técnico de campo experto en la gestión de recursos naturales.

Los actores del factor D conciben a la energía como servicio público. Consideran fundamental evaluar los impactos de la PE mediante indicadores. Proponen la incorporación del aspecto técnico como una dimensión de sustentabilidad de la PE. Consideran que el uso de herramientas virtuales es un mecanismo viable para operativizar la participación social, siempre que se generen instancias posteriores de participación presencial y se tomen en cuenta la opinión de los actores.

En base a la grilla ideal de estos participantes se evidencia que se oponen a la incorporación de la dimensión persona. Respecto a la dimensión permanencia, los actores se manifiestan a favor de su inclusión como una nueva dimensión de la PE.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Existe consenso unánime en que el concepto de sustentabilidad tradicional es limitado para abordar la PE. Para todos los actores, el modelo conceptual de PE 5D es una alternativa innovadora, factible de implementar y con potencial para mejorar la sustentabilidad social de las ER. Si bien, existen perspectivas sociales que no manifiestan una aceptación explícita a la inclusión de la dimensión permanencia, si se evidencia la necesidad de incluir el componente temporal en la PE. En el caso de la dimensión persona, dos de los cuatro factores se oponen a considerar la cosmovisión de los actores como una dimensión emergente de la PE (factores C y D), pero todas las perspectivas sociales consideran que la inclusión de la cosmovisión de los actores resulta relevante. En vista de ello, y en base a las afirmaciones de consenso, es posible afirmar que el modelo de PE 5D cuenta con validez social de expertos y tomadores de decisiones del área de la planificación y gestión de la energía.

Para los actores es preciso incluir en el análisis las interacciones entre las cinco dimensiones propuestas. Este aspecto posiciona a la PE 5D en el marco conceptual de gobernanza para la sustentabilidad (Iribarnegaray y Seghezzi, 2012). Ello implica que la PE es también un proceso de aprendizaje multinivel de la gestión de la energía, condicionado por restricciones sociales, institucionales y del sistema biofísico.

La conceptualización del acceso a la energía como derecho humano constituye uno de los puntos de consenso más relevante, siendo congruente con el modelo de PE 5D. El discurso de los expertos consultados coincide con los discursos internacionales, que reconocen el rol del acceso a la energía como derecho humano, como facilitador de derechos y como medio para reducir la pobreza (García, 2006; Giannini et al., 2010). La visión del acceso a la energía como derecho humano, en base a las afirmaciones de consenso, resulta convergente solo cuando se considera la existencia de un umbral mínimo de consumo que garantiza la supervivencia y bienestar de las personas, por encima de dicho umbral las perspectivas sociales resultan disímiles. Por ejemplo para el factor A y D la energía debería ser un servicio público, el factor B se opone a esta visión y el factor C se manifiesta neutral ante esta interpretación. Sin embargo, todas las perspectivas sociales se oponen (en grados diversos) a la

concepción de la energía como bien de mercado, aspecto que se contradice con las políticas energéticas nacionales vigentes.

Considerando los indicadores socioeconómicos de pobreza y privación energética desarrollados para la Argentina (Durán y Condorí, 2016; Durán y Condorí, 2015), el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, PNUD, 2017), el documento presentado ante el foro de Energía de Holanda (Ministerio de Energía y Minería. Secretaría de Planeamiento Energético Estratégico., 2017) y las perspectivas sociales identificadas; el escenario energético puede interpretarse como un problema de naturaleza ecológico-distributivo. Martínez- Alier (1997) define a dichos conflictos como aquellas “asimetrías o desigualdades sociales, espaciales, temporales en el uso que hacen los humanos de los recursos y servicios ambientales, comercializados o no, es decir, la disminución de los recursos naturales (incluyendo la pérdida de biodiversidad) y las cargas de la contaminación”. En consecuencia el recurso energético se posiciona como un recurso común. En este marco, los actores perciben a las ER como un recurso estratégico para avanzar en la equidad en el acceso a la energía, mitigar el conflicto ecológico distributivo del acceso a la energía, mitigar el efecto de la penalidad de la pobreza energética y minimizar el impacto ambiental del sistema energético. Aspectos que validan el modelo de PE 5D.

Los actores validaron la interpretación de la subdimensión sociedad como módulo homogéneo y su definición en base a la relación que tienen las personas con la energía, en términos de acceso, e indicadores socio-económicos. La perspectiva de los actores es congruente con los estudios de PE realizados por el Instituto de Economía Energética et al. (2014). La definición de estos colectivos sociales mediante indicadores socio-económicos, cuenta con validez en el ámbito del análisis de pobreza energética (González-Eguino, 2015).

Los participantes Q coinciden en que la evaluación financiera es limitada para definir políticas públicas. Consideran más acertada a la evaluación económica con la inclusión de las externalidades del modelo energético. Proponen incluir el análisis la distribución de dichos costos y beneficios en la sociedad. Los consensos identificados en torno a la subdimensión ambiente, refieren a la aceptación del indicador energía para evaluar el impacto local de la PE e implementación de ES, siempre que se empleen otros indicadores para complementar el análisis. Los expertos consideran que el indicador energía es relevante para evaluar el impacto local y que su interpretación es sencilla. La inclusión de la dimensión permanencia ha sido validada por los expertos consultados. Los factores, consideran la existencia de un continuo en el tiempo y el espacio entre el escenario actual y el escenario deseado. En consecuencia, destacan la necesidad de seguir la evolución del SSE en el tiempo, con lo cual resulta limitado definir la situación actual y deseada. Aun cuando la inclusión de la dimensión permanencia constituye un punto nodal de consenso, existen divergencias en la importancia relativa que los factores otorgan al estudio del escenario actual. Por ejemplo, el factor C considera que es más importante trabajar en el diagnóstico que en el monitoreo de la PE y su evaluación expost.

La dimensión persona fue un eje controvertido de análisis para los expertos consultados. Solo el factor A considera que la cosmovisión de los actores debe emerger como una nueva dimensión de sustentabilidad. El resto de los factores se opone a su inclusión como dimensión emergente o se muestra neutral, pero ello no significa que se oponen a una PE con participación social. Sencillamente existen otros aspectos que se consideran más relevantes. Por ejemplo para el factor B los aspectos técnicos de la PE deberían emerger como un componente más de la sustentabilidad. Es posible pensar que para los factores B, C y D la inclusión de la dimensión persona es una redundancia, ya que la cosmovisión de los actores se encuentra autocontenida en la dimensión sociedad. Por ejemplo, la definición de módulos homogéneos, implica identificar colectivos sociales que tienen una relación particular con la energía, con lo cual se aborda indirectamente la dimensión persona. Sin embargo, la dimensión social no puntualiza en un aspecto relevante: “la relación entre las personas y la tecnología”. Dicha relación puede conceptualizarse como una interacción a nivel micro, entre la cultura y la tecnología, conforme a lo planteado por Iribarnegaray y Seghezze (2012). Dicha interrelación puede considerarse implícita si se piensa a las tecnologías como tecnologías para la inclusión social, según lo expuesto por Thomas et al. (2012). Aplicando dicha lógica, es posible encontrar un nuevo punto de convergencia entre el factor A y el factor C: “la tecnología como

constructo social y no como elemento exógeno al SSE”. En vista de ello, la PE no implementaría tecnologías sino que promovería el desarrollo de tecnologías (renovables) de inclusión social. Así, la dimensión persona se presenta como un eje transversal de la PE que congrega el resto de las dimensiones. Esta perspectiva resulta congruente a todos los factores, y podría explicar porque para los paternalistas (factor D) los actores no deben intervenir en la definición de la meta de penetración tecnológica ya que esta depende de restricciones financieras y económicas.

N° de afirmación	Factor A		Factor B		Factor C		Factor D	
	Z	Rango	Z	Rango	Z	Rango	Z	Rango
1	1.77	5	1.85	5	1.3	3	2.01	5
2	-0.7	-2	-1.09	-3	-2.10*	-5	-0.19*	-1
3	-1.06**	-3	-0.35	-1	-0.06	0	0.57	2
4	1.22**	3	-0.87	-2	-0.44	-1	2.36**	5
5	0.48	1	0.52	1	-1.46**	-4	-0.12*	-1
6	1.72	5	1.63	4	1.28	3	2.50**	5
7	-0.2	-1	1.11*	3	0.22	1	0.35	1
8	0.57	1	0.93	3	-0.80**	-2	0.22	0
9	0.24	0	0.6	1	-0.84	-2	-0.85	-2
10	1.14	3	0.01	0	0	0	1.31	4
11	-1.23	-3	1.58**	4	-1.88	-5	0.21**	0
12	0.57	1	0.76	2	1.04	3	0.46	1
13	-0.12	0	1.70**	5	-0.42	-1	0.58*	2
14	0.9	2	-0.32**	-1	1.46	4	0.52	1
15	-0.49	-1	-0.89	-3	1.70**	5	-1.44	-4
16	-2.12	-5	-0.48*	-1	-1.3	-4	-1.69	-5
17	-0.17	-1	-1.13	-3	-0.64	-2	-0.98	-3
18	-0.67	-1	-0.71	-2	-1.44	-4	-0.64	-2
19	0.04	0	0.48	1	1.66**	4	-0.18	-1
20	0.7	2	1.95*	5	1.02	2	0.01**	0
21	0.73	2	1.05	3	1.3	3	1.43	4
22	-1.90*	-5	-0.42	-1	-0.58	-1	-2.46*	-5

N° de afirmación	Factor A		Factor B		Factor C		Factor D		N° de afirmación	Factor A		Factor B		Factor C		Factor D	
	Z	Rango	Z	Rango	Z	Rango	Z	Rango		Z	Rango	Z	Rango	Z	Rango	Z	Rango
23	-0.32	-1	0.79	2	0.2	0	0.9	3	45	0.28**	0	-1.83*	-5	-1.04	-3	-0.37	-1
24	1.32	4	1.35	4	1.04	3	0.36	1	46	0.32	0	0.91	2	0.84	2	0.22	0
25	0.97**	-2	2.29**	-5	1.48**	4	0.00**	0	47	1.1	3	1.47	4	1.66	4	0.99	3
26	0.5	1	0.27	1	0.58	1	0.07	0	48	-1.72	-4	-1.49	-4	-1.26	-3	-0.76	-2
27	-0.85	-2	-1.2	-3	-0.36	-1	0.41*	1	49	-1.42	-4	-0.79	-2	-1.28	-3	-1.42	-4
28	-1.31	-4	-1.22	-4	-1.06	-3	-1.67	-4	50	0.92*	3	-0.57	-1	0	0	1.29*	-4
29	0.83	2	0.92	2	0.24	1	0.97**	-3	51	0.1	0	-0.26	0	0.64	2	0.36	1
30	-0.91	-2	-1.62	-5	-1.28	-3	0.62**	2	52	-0.45	-1	-0.29	0	0.2	0	-0.33	-1
31	-1.16	-3	-0.9	-3	-0.18	0	-0.88	-2	53	-0.13	0	-0.04	0	0.42	1	0.55	2
32	1.44	5	1.21	3	1.28	3	1.02	3	54	0.52	1	0.59**	-2	1.66	4	0.91	3
33	-0.52	-1	-0.58	-1	0.44	1	0.61	2	55	1.32**	4	-0.72	-2	-0.62	-2	-0.38	-1
34	0.01	0	0.04	0	-0.42	-1	0.24	1	56	-1.03	-3	-0.6	-2	0.62**	1	-0.43	-1
35	-1.3	-3	-0.31	0	0.16	0	-0.91	-2	57	0.42	1	0.27	1	0.2	0	1.16*	4
36	1.31	4	0.46	1	-0.2	-1	1.08	4	58	-0.99	-2	-1.04	-3	-0.02*	0	-1.19	-3
37	0.75	2	0.36	1	-0.2	-1	0.7	2	59	0.30*	0	-0.34	-1	-0.82	-2	-0.64	-2
38	1.33	4	0.86	2	0.88	2	0.83	3	60	-0.78	-2	0.14	0	-0.86	-2	-0.12	0
39	-1.77	-5	-0.76	-2	-1.26	-3	-1.02	-3	61	-1.09	-3	-1.36	-4	-0.84	-2	-1.11	-3
40	0.7	2	1.33	3	0.58	1	-0.03	0	62	1.22	3	0.39**	-1	1.06	3	0.39	1
41	1.08	3	1.01	3	0.00*	0	0.81	2	63	-0.14	-1	-0.3	0	-0.22	-1	-0.13	-1
42	0.53	1	-0.24	0	0.66	2	-0.77	-2	64	0.8	2	0.39	1	0.62	1	1.02	3
43	0.66	1	0.76	2	1.48**	-4	0.02**	0	65	-1.33	-4	-1.43	-4	-1.7	-5	-1.74	-5
44	-0.98	-2	0.7	2	0.62	1	-1.07	-3									

Tabla 2. Arreglo de los factores obtenidos y valores obtenidos por cada afirmación. Las afirmaciones se indican con números; ver una descripción completa en el texto. Las afirmaciones distintivas (estadísticamente significativas) para cada factor se indican con para $p < 0.05$ (*) y para $p < 0.01$ (**). Z: valores z expresados en desviaciones estándar.

REFERENCIAS

- Addams, H. and Proops, J. (Ed.) (2000). *Social discourse and environmental policy: an application of Q methodology*. Massachusetts: USA: Edward Elgar Publishing.
- Alberg P. and Lund H. (2011). A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. *Applied Energy*, 88(2), 479-487.
- Barry, J., and Proops, J. (1999). Seeking sustainability discourses with Q methodology. *Ecological Economics*, 28(3), 337-345.
- Batel, S. and Devine-Wright, P. (2014). Towards a better understanding of people's responses to renewable energy technologies: Insights from Social Representations Theory. *Public Understanding of Science*, 24(3), 311-325.
- Brown, S. (1980). *Political subjectivity: Applications of Q methodology in political science*. Connecticut, USA: Yale University Press.
- Brown, S. (1993). A primer on Q methodology. *Operant Subjectivity*, 16, 91-138.
- Brown, S. (1996). Q methodology and qualitative research. *Qualitative Health Research*, 6(4), 561-567.
- Cruz, I.; Sauad J. y Condori M. (2015) La planificación energética: una interpretación desde la sustentabilidad de las cinco dimensiones y la producción tabacalera como estudio de caso. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*; 19; 7; 11-2015; 1-12
- 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*, 19, 12.57-12.67.
- Durán, R., y Condori, M. (2016). Índice multidimensional de pobreza energético para Argentina: su definición, evaluación y resultados al nivel de departamentos para el año 2010. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20 (12), 21-32.
- García, E. (2006). Desafíos del sector de la energía como impulsor del desarrollo humano. *Cuadernos Internacionales de tecnología para el desarrollo humano*, 5, 1-13.
- Giannini Pereira, M., Vasconcelos Freitas, M. and Da Silva, N. (2010). Rural electrification and energy poverty: Empirical evidences from Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1229-1240.
- González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 377-385.
- Haralambopoulos D. and Polatidis H. (2003). Renewable energy projects: Structuring a multicriteria group decision-making frame work. *Renewable Energy*, 28(6), 961-973.
- Instituto de Economía Energética, Stockholm Environment Institute y Fundación Bariloche. (2014). *Modelos energéticos*. Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche.
- Iribarnegaray, M., and Seghezzi, L. (2012). Governance, Sustainability and Decision Making in Water and Sanitation Management Systems. *Sustainability*, 4(11), 2922-2945.
- Krajačića G., Duića N., Zmijarević Z., Mathiesend V., AnićVučinića A. and Graça Carvalho M. (2011). Planning for a 100% independent energy system based on smart energy storage for integration of renewables and CO2 emissions reduction. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), 2073-2083.
- Lund H. (2010). *Renewable Energy Systems: The Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions*. Oxford, United Kingdom: El Sevier.
- Martínez Alier, J. (1997). Conflictos de distribución ecológica. *Revista Andina*, 19, 41-76.
- Martins, N. (2016). Ecosystems, strong sustainability and the classical circular economy. *Ecological Economics*, 129, 32-39.
- McKeown, B. and Thomas, D. (1988). *Q Methodology*. California, USA: Sage Publications.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, PNUD. (2017). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- Ministerio de Energía y Minería. Secretaría de Planeamiento Energético Estratégico. (2017). *The beginning of the transformation*.
- Painuly, J. (2001). Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. *Renewable Energy*, 24(1), 73-89.
- Pohekar S. and Ramachandran M. (2004) Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planninga review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365-381.
- Quijano R. (2012). *Diseño e implementación de una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible–MODERGIS – “Estudio de caso Colombia”*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

- Ramachandra T. (2009). RIEP: Regional integrated energy plan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 285-317.
- Reddy, S. and Painuly, J. (2004). Diffusion of renewable energy technologies- barriers and stakeholders perspectives. *Renewable Energy*, 29 (9), 1431–1447.
- Rodríguez M. (2012). La ordenación y la planificación de las fuentes renovables de energía en la isla de Cuba desde una perspectiva territorial. Estudio de caso en el municipio de Guama- a partir de un geoportal. Tesis Doctoral. Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, Sevilla, España.
- Seghezzeo, L. (2009). The five dimensions of sustainability. *Environmental Politics*, 18(4), 539-556.
- Thomas, H., Fressoli, M. y Santos, G. (2012). Tecnología, desarrollo y democracia. Nueve estudios sobre dinámicas socio-técnicas de exclusión/inclusión social. Buenos Aires, Argentina: MINCyT.
- Tsoutsos T., Drandaki M., Frantzeskaki N., Losifidis E. and Kiosses I.(2009) Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy* (37) 1587–1600.
- Van Exel, J. and De Graaf, G. (2005). Q methodology: A sneak preview. Retrieved January, 24, 2009.
- Webler, T., Danielson, S. and Tuler, S. (2009). Using Q method to reveal social perspectives in environmental research. Greenfield MA, USA: Social and Environmental Research Institute, 54, 1-45.
- Wolsink, M. (2007). Planning of renewables schemes: Deliberative and fair decision-making on landscape issues instead of reproachful accusations of non-cooperation. *Energy Policy*, 35(5), 2692-2704.

ABSTRACT

The social perception of decision makers and experts in energy planning, on energy, energy planning models, sustainability and socio-ecological system problems, define intervention policies in the territory and condition the social sustainability of energy implementation renewable. This study analyzes the social perspectives of decision makers and experts and validates the conceptual model of PE of five dimensions (PE 5D), applying the Q methodology. Four social perspectives were found (participatory, technical, economic and protective) , which show that the energy resource is a common resource and access to energy a human right. It is concluded that: the PE 5D model has social validity, the traditional sustainability model is obsolete and that the current energy model constitutes an ecological distributive problem. Renewable energy potential change the current scenario.

Keywords: energy planning, sustainability, Q methodology, social perception, renewable energies..

DESARROLLO DE SISTEMA PARA INTEROPERABILIDAD DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN PROYECTO DE RED INTELIGENTE CON APORTE DE FUENTES RENOVABLES. PRIER - ARMSTRONG (SANTA FE, ARGENTINA)

**Mg. Ing. Marcos Politi, Téc. Alex Cruz, Téc. Cristian Acosta, Lic. José Luis González,
Dr. Ing. Héctor Laiz**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI
Energías Renovables – Av. Gral. Paz 5445 – Buenos Aires
Tel. 4724-6200– e-mail: mpoliti@inti.gob.ar

Recibido 10/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: Este trabajo describe una posible solución cuando en una misma red eléctrica inteligente se opera bajo distintos estándares de comunicación, y/o bajo dispositivos multimarca, los cuáles hacen imposible una integración de las mediciones realizados en una misma plataforma de una manera armónica y ordenada, lo cual permitiría a un software inteligente, que trabaje en un plano superior predecir y de esta manera actuar frente al comportamiento de los usuarios de la red, en base al aprendizaje de la información recopilada anteriormente. La utilización de tecnología conocida como Internet de las cosas, hace proclive el poder virar desde una red inteligente que sólo reporta datos a una que en base al análisis de todos los datos que llegan a ella pueda auto administrarse. Para la topología de red eléctrica y la distribución de los puntos de medición, en la localidad de Armstrong, Santa Fé, se ha podido verificar que la tecnología *LoRa*, es correcta para implementar en una red propia de medición, respetando las distancias máximas de comunicación, con la posibilidad, además, de integrar todos los datos de medición, dentro de una misma plataforma de información.

Palabras clave: energía solar, energía renovable, solar fotovoltaica, inversores, redes eléctricas inteligentes, internet de las cosas.

INTRODUCCION

El sector eléctrico en los últimos años está experimentando cambios sustanciales que están provocando un replanteo del sistema y de sus infraestructuras a nivel global. Las razones que están impulsando este cambio son múltiples, e incluyen consideraciones tanto a nivel local como global, de entre las cuales podemos destacar aquí algunas de ellas: la necesidad estratégica de diversificación en las fuentes de energía, el creciente desarrollo de las fuentes de energía renovables, los cambios en las necesidades de consumo energético del usuario, y el aumento de los niveles de calidad exigidos en la energía que llega al cliente

Este contexto genera una coexistencia, cada vez mayor, entre la generación convencional y la generación distribuida, conocida en inglés como Recursos Energéticos distribuidos (REDs).

Las consideraciones anteriores han traído como consecuencia un aumento de la complejidad en la gestión del sistema eléctrico, sobre todo en las áreas de distribución, donde el planteamiento de un modelo pasivo de consumo energético está dando paso a un aumento de la penetración de REDs y de la existencia de flujos de energía bidireccionales.

De hecho, esta tendencia se espera que vaya en aumento en los próximos años, y demanda que el sistema evolucione a un modelo activo, mucho más inteligente, conocido como *Smart Grid*, o Red Eléctrica Inteligente (REI), la cual está compuesta por distintos componentes eléctricos y electrónicos, que en la Guía AEA 92559 (Asociación Electrotécnica Argentina, 2017) en Argentina, la define como “la conjunción de la red eléctrica tradicional con tecnologías modernas de la información y comunicación, que permite integrar datos provenientes de los distintos puntos de la cadena eléctrica, desde el generador hasta el usuario final; y transformarlos en información y acciones que lleven a una

mejora en su gestión. Su objetivo es elevar la eficiencia, confiabilidad, sustentabilidad, calidad de servicio y producto, para hacer frente a los nuevos desafíos de múltiples generadores diversos y estilos de consumo.”

Analizando frase a frase podemos observar la necesidad de la Internet de las cosas y todos sus conocimientos relacionados aplicados para la administración de la red.

Una red inteligente, según AEA 92559, permite integrar datos, de aquí se puede desprender necesidades de procesamiento de grandes cantidades de datos, *big data*.

En una red inteligente, según AEA 92559, es necesario obtener datos medidos, provenientes de los distintos puntos de la cadena eléctrica, para ellos es necesario contar con dispositivos adaptados para esta función, pero sobre todo habla de dispositivos distribuidos en la red, *IoT* propiamente dicho.

Para finalmente, en una red inteligente según AEA 92559, poder transformar estos datos en información y acciones que lleven a una mejora en su gestión, orientándose claramente a la necesidad de la autogestión de la red, o *machine learning*.

Las consideraciones anteriores han traído como consecuencia un aumento de la complejidad en la gestión del sistema eléctrico, sobre todo en las áreas de distribución, donde el planteamiento de un modelo pasivo de consumo energético está dando paso a un aumento de la penetración de REDs y de la existencia de flujos de energía bidireccionales.

En esta nueva REI, el control de la interconexión eléctrica en el punto de conexión (PC) entre los equipos REDs, las cargas y la red adquiere un papel fundamental (Rafael Real-Calvo et al., 2017).

Para ello será necesario que este equipamiento satisfaga las nuevas necesidades, que en muchos casos van más allá de la propia electrónica de potencia. Y es en este escenario donde los Dispositivos Electrónicos Inteligentes cobran un valor fundamental, integrando los requisitos energéticos de una comunidad o ciudad, con las bondades y funcionalidades de los sistemas electrónicos existentes en el mercado.

Para el diseño de un dispositivo electrónico Inteligente (DEI), es necesario en muchos casos sistemas embebidos en microcontroladores y/o microprocesadores capaces de poder manejar datos, y con gran capacidad de procesamiento, capaces además de poder comunicarse a distancias lejanas desde los puntos de toma de muestra y control de dicho dispositivo.

Pero más allá de las prestaciones que sean necesarias para este DEI, es necesario respetar ciertas características de los mismos, para poder satisfacer a los retos de la tecnología (Rafael Real-Calvo et al., 2017).

Estos son:

- i. Interacción en tiempo real entre el equipo y las entidades remotas de gestión del sistema, así como con diferentes entidades que estén dentro del área de distribución.
- ii. Determinismo temporal en las comunicaciones y marcación temporal en los datos.
- iii. Especificaciones de respuesta temporal adecuadas para la monitorización de parámetros y para las acciones de protección, utilizando el contexto normativo en vigor.
- iv. Multifuncionalidad, para poder operar en diferentes ámbitos, en calidad de suministro, en protección, o ambas simultáneamente.
- v. Modularidad, al tener que integrarse en un conjunto de equipos muy heterogéneo.

En la Argentina, existen proyectos pilotos donde se estudian las REIs, sus aplicaciones y beneficios, existe en Armstrong, Santa Fé uno de ellos, allí habitan actualmente alrededor de 11.000 personas los cuales conforman un mercado eléctrico de aproximadamente 4000 usuarios, se encuentran instalados en la red 1000 medidores inteligentes de cuatro distintas marcas, las cuales tienen distribuidores en Argentina, dando lugar a una red eléctrica monitoreada inteligente.

Las tecnologías de energías renovables, que inyectan su energía en esta red, son solar fotovoltaica y eólica de baja potencia, dentro de solar fotovoltaica se tiene instalada una planta de 200 kW y cincuenta instalaciones de techo de 1,5 kW, todo esto conectado a través de un sistema eléctrico que permite por medio de medidores bidireccionales inteligentes el control, supervisión y el monitoreo a distancia de las instalaciones.

El sistema fotovoltaico (SFV) en los techos inyecta su energía generada directamente a la red de baja tensión (BT), y esta inyección es controlada a través de un medidor de energía inteligente, pero la red inteligente permite su monitoreo y control sólo hasta el medidor inteligente, dejando al inversor fotovoltaico afuera de la misma, dado que se encuentran aguas abajo del mismo.

En este proyecto piloto Nacional, se compraron inversores fotovoltaicos de distintas marcas, para poder analizar de esta manera la interoperabilidad de los mismos en la red, accediendo a ellos y modificando los parámetros correspondientes, se tiene la posibilidad de mejorar valores de calidad de energía del sistema, entre otros, y por ende mejorar el sistema energético en la localidad de Armstrong.

Al día de hoy eso es imposible debido a que no existe una plataforma general que permita acceder a los mismos de manera remota, sino que debe hacerse conectándose a la red *WiFi* que cada uno de ellos ofrece en funcionamiento en modo Server, lo cual hace que sea imposible poder configurarlos a todos de manera automática.

Pero existe otro puerto del inversor fotovoltaico que es accesible, el mismo es el puerto Ethernet a través del protocolo *Modbus*, a través de él se puede acceder a los inversores fotovoltaicos con el mismo funcionando como esclavo, de esta manera es posible acceder a sus registros, incluso al de todos los inversores conectados en la red, y modificar a gusto, a través de una plataforma única que integre todas las marcas de inversores.

RED INTELIGENTE.

La IEEE define a la red inteligente como un sistema de sistemas donde detallan

- ✓ Capa de potencia y energía.
- ✓ Capa de comunicaciones.
- ✓ Capa informática.

La capa de potencia y energía es la capa donde se produce el despacho de energía, en algunas de las tecnologías coincide con la capa de comunicaciones, llevando los datos a una frecuencia de portadora mucho mayor que los 50 Hz.

En tanto la capa de comunicaciones e informática, son las capas donde se define al flujo de datos producto de mediciones, comandos, alarmas, estados, señalizaciones u otro tipo de variables que viajan desde y hacia cualquiera de los dispositivos o elementos que componen a la red eléctrica inteligente.

Las comunicaciones son la columna vertebral de una REI. Éstas juegan un papel fundamental, permitiendo a los diversos equipos distribuidos conectarse con los centros de gestión de la información.

Respecto al tipo de comunicaciones a la actualidad existen las siguientes

- ✓ Telefonía móvil: *GSM* (2G), *GPRS/EDGE* (2,5G), *UTMS* (3G), *WiMax*(4G), *LTGE* (4G).
- ✓ Telefonía fija.
- ✓ RF 2,4 GHz de Corto Alcance: *ZigBee*, *Bluetooth*, soluciones propietarias.
- ✓ Onda Portadora: PLC (Power Line Carrier Communication).
- ✓ *WiFi*.
- ✓ Enlace por RF Soluciones propietarias.
- ✓ Fibra Óptica: Multi-modo, mono-modo.
- ✓ Satelital: *LEO* (Orbita baja) *GEO* (Geoestacionario)

Cada una de ellas ofrece prestaciones diferenciadas las cuales se pueden apreciar en la siguiente Figura.

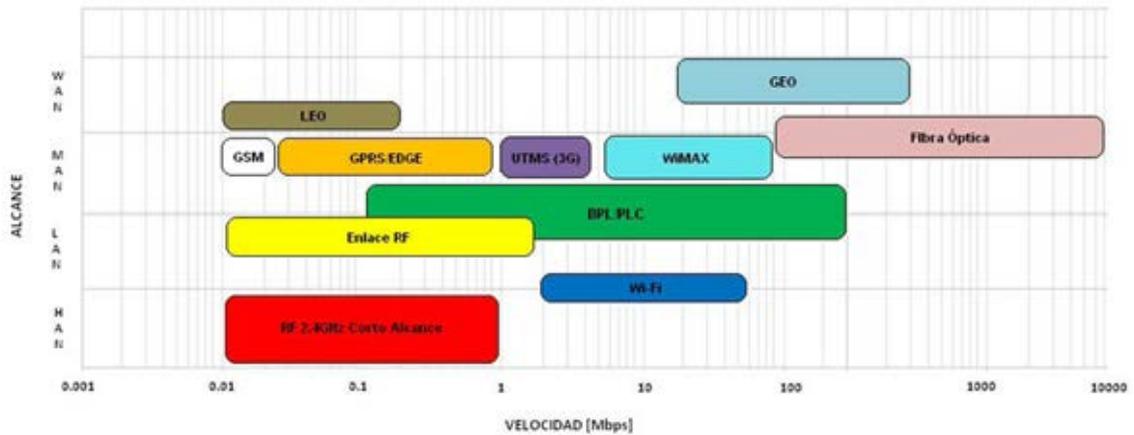


Figura 1: Relación entre alcance y velocidad por tecnología en REIs. [1]

En los últimos años, la elección de las distintas tecnologías de comunicación aplicadas a una REI, presentó la siguiente distribución.

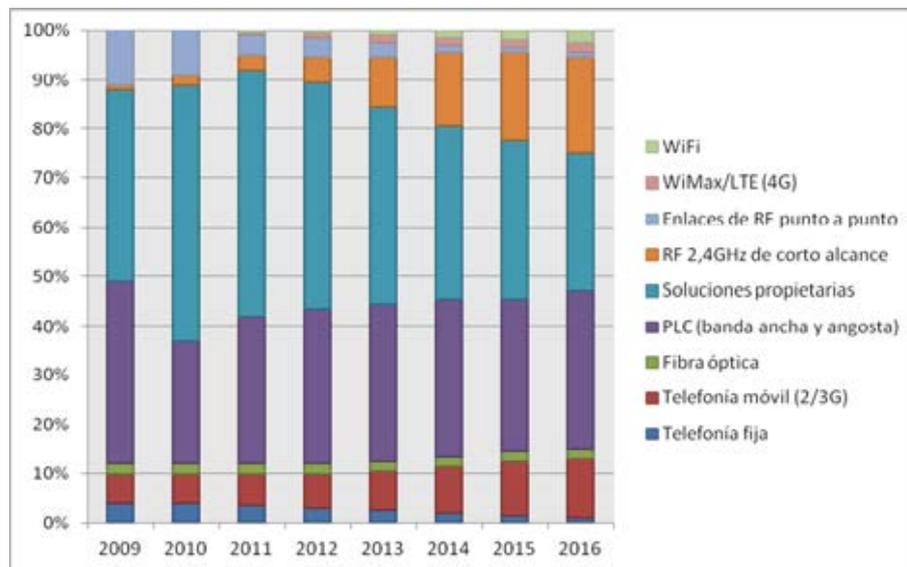


Figura 2: Elección por tecnología en REIs. [1]

LPWAN.

Por otro lado, existen tecnologías más nuevas las cuales son más apropiadas para implementaciones en control y monitoreo inalámbrico en REIs.

La arquitectura de automatización de energía actual se desarrolló en base a estándares para satisfacer los requisitos particulares de la generación centralizada y sistemas de transmisión. Con la rápida integración de recursos energéticos distribuidos, el diseño actual no puede cumplir requisitos de los cambios rápidos que están sucediendo en la demanda.

Mientras tanto, los usuarios finales no tienen la experiencia requerida para operar y mantener sistemas tan complicados.

Para superar esta barrera, red de área amplia de baja potencia (*LPWAN*) es una nueva solución en el contexto de un avance inalámbrico en el sector de comunicación. A diferencia de *WiFi* y *ZigBee*, *LPWAN* habilita conexiones inalámbricas masivas que cubren largas distancias con un mínimo consumo de energía y mantenimiento.

Dos representantes de las tecnologías de *LPWAN* son el Internet de las cosas de banda estrecha (*NB-IoT*) y *Long Range (LoRa)* tecnología.

El *NB-IoT* es heredado de la comunicación celular, y funciona a la perfección el sistema global existente para móvil (*GSM*) y la evolución a largo plazo (*LTE*) redes en bandas de frecuencia con licencia. En muchas telecomunicaciones los operadores han estado trabajando ambiciosamente en tejer juntos Redes de Internet de las cosas (*IoT*) basadas en *NB-IoT*.

A diferencia de la tecnología *LoRa*, esta opera en la banda de frecuencia sin licencia, por lo que los usuarios finales pueden construir *gateways LoRa* similares a los enrutadores *WiFi* en una casa. Por lo tanto, la tecnología *LoRa* es perfecta para las regiones periféricas sin cobertura de red celular, o para establecer redes privadas con requisitos específicos de calidad y seguridad (Wixted AJ et al., 2016).

LPWAN representa una nueva tendencia en la evolución de las tecnologías de *IoT*.

A diferencia de 3G / 4G o *WiFi*, estos sistemas no se enfocan en habilitar altas velocidades de datos por dispositivo o minimizando la latencia. Más bien, la métrica de rendimiento definidas para *LPWAN* son eficiencia energética, escalabilidad, y cobertura.

Muchos jugadores de *LPWAN* han venido al mercado, con los dos jugadores más ampliamente aceptados siendo el *LoRa* y Tecnologías *NB-IoT*.

TECNOLOGÍA LORA.

La tecnología *LoRa*, desarrollada por Semtech, es la más utilizada tecnología para *LPWAN* en la banda sin licencia sub-GHz. Debido a la utilización de bandas sin licencia, la red *LoRa* está abierta a los clientes que carecen de autorización de los reguladores de radiofrecuencia. Como resultado, la red *LoRa* es fácil de implementar en un rango de más de varios kilómetros, y atiende a clientes con una inversión mínima y costos de mantenimiento.

La máxima pérdida de acoplamiento para la modulación *LoRa* alcanza valores altos, desde 148 dB-20 dB, estos valores son mayores que el de las comunicaciones existentes sub-GHz, esto es vital para extender la distancia de cobertura a kilómetros y aumentar capacidad de la red.

La modulación *LoRa* presenta seis factores de expansión que mejoran el *Adaptive Data Rate (ADR)*, lo cual permite que *LoRa* controle la velocidad de datos y la potencia de transmisión del dispositivo, de modo que use menos tiempo de transmisión y menos energía para transmitir la misma cantidad de

datos. Esto no solo es beneficioso para el consumo de energía del dispositivo, sino que también optimiza el espectro. Esta característica permite múltiples diferentes señales de propagación para ser transmitidas al mismo tiempo en el mismo canal de frecuencia.

En este entorno, la especificación de la tecnología *LoRa* ha definido tres modos de diferentes ventanas de recepción de datos para diferentes escenarios de aplicación.

Además, la tecnología *LoRa* admite el cifrado de datos para garantizar la seguridad del canal mediante pares de claves cifradas AES-128. Hasta ahora, la tecnología *LoRa* ha sido probada en 56 países en demostraciones sobre medidores inteligentes, seguimiento del tráfico, redes eléctricas inteligentes, dispositivos inteligentes, y cuidado de la salud inteligente.

En los Países Bajos, la empresa que trabaja como operador de telecomunicaciones holandés, KPN, ha desplegado una red *LoRa* que cubre todo el país, como tiene SK Telecom en Corea. Además, una Alianza *LoRa* con más de 300 miembros está colaborando para definir un estándar global abierto para conectividad *LPWAN* segura y de grado de operador que representa las diferentes capas de un ecosistema, desde conjuntos de chips, módulos, dispositivos, y puertas de enlace a la red y servidores de aplicaciones (Yonghua Song et al., 2017).

Los dispositivos que forman parte de los sistemas de generación distribuida de energía suelen estar geográficamente dispersos, haciendo que las tecnologías *IoT* como *ZigBee* y *WiFi* sean difíciles de usar. Bajo tales escenarios, *LPWAN* se convierte en la alternativa a utilizar.

La capa de transmisión *LPWAN* establece canales inalámbricos entre los dispositivos finales y la plataforma en la nube. En los distritos periféricos sin cobertura celular, la red *LoRa* es la elección práctica, ya que forma una topología estrella alrededor de dispositivos finales que son servidos por una estación base única (BU), una BU de *LoRa* que está configurada en una subestación en una zona rural se comunica con fotovoltaica distribuida, por ejemplo.

SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta consiste en diseñar y confeccionar un sistema compuesto por un equipo *master* y distintos equipos *slaves* distribuidos en la ciudad, que formarán parte de una gran red de radiofrecuencia (RF) en Armstrong, Santa Fe, esta red, permitirá establecer la comunicación entre los distintos dispositivos, independizándose de la conectividad a internet.

Los equipos denominados *slaves* se conectarán a los inversores fotovoltaicos a través de su puerto RJ-45, y se comunicarán a él, utilizando el protocolo *Modbus*, los mismos se encontrarán en los techos de las casas que sean poseedoras de instalaciones fotovoltaicas domiciliarias, a una distancia cercana de los inversores CC-CA.

Por otro lado, se deberá instalar un equipo concentrador y administrador de datos, que funcione como *Gateway*, uniendo las dos redes existentes en Armstrong, una de internet, y la otra de RF generada por dispositivos específicos para esta funcionalidad, este equipo, denominado equipo *master*, se colocará en la cooperativa aguardando la llegada de los datos de los *slaves* colocados en distintos puntos de la ciudad.

Este sistema formado por el *master* y los distintos *slaves*, generará las distintas comunicaciones que permitirán tomar control de los distintos inversores multimarca instalados en la ciudad, conociendo donde se encuentran ubicados los registros correspondientes a las magnitudes que deseamos conocer, enviándoles los comandos correspondientes para su configuración correspondiente a cada modo de uso, dependiendo de las necesidades eléctricas de la Cooperativa, ya sea para estudio o para mejorar la performance de la red eléctrica.

Para poder realizar el control de los mismos es necesario poder contar con un equipo que permita un alcance mayor y con posibilidad de poder armar una red en la ciudad, para lo cual se propone utilizar *LoRa*, como red de RF, conectado al microcontrolador, que se ubicará en las cercanías del inversor

fotovoltaico, por medio de *UART* o *SPI*. De esta manera se concibe a un equipo *slave* que hacia la red de la ciudad se conectara a través de *LoRa* y hacia el inversor a través del puerto *Ethernet* utilizando el protocolo *Modbus*.

Ambos tipos de equipo, el *master* y los *slaves* tendrán cada uno, un dispositivo de comunicaciones *LoRa*, de la firma *Semtech*, el mismo posee características que lo hacen ideal para este tipo de comunicaciones, permitiendo alcances de hasta 3 km.

Para poder procesar los datos, los equipos *master* y *slaves* cuentan además del dispositivo de *Semtech*, con un microcontrolador Atmel Cortex M0 de 32 bits, más una interfaz de comunicación *Ethernet*, dicha interfaz *Ethernet* es utilizada en los dispositivos *slaves* para comunicarse por protocolo *Modbus* al inversor, y en el dispositivo *master*, para poder comunicarse a un switch cercano, realizando la subida de datos a través de Internet mediante el protocolo *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*), a una plataforma abierta, en este caso, *Ubidots*.

Los equipos *slaves*, se encontrará ubicado dentro de una caja de característica IP65, con una antena hacia su exterior, alimentado por una batería de Ion-Litio de 4.2 V, mientras que el *master* podrá ser conectado a la red de distribución local, con las adecuaciones de tensiones necesarias para tal fin.

El esquema gráfico del sistema a implementar es el que se detalla a continuación, los equipos *slaves* y *master*, se pueden encontrar distanciados en Armstrong a no más de 200 m, dada la topología de la ciudad.

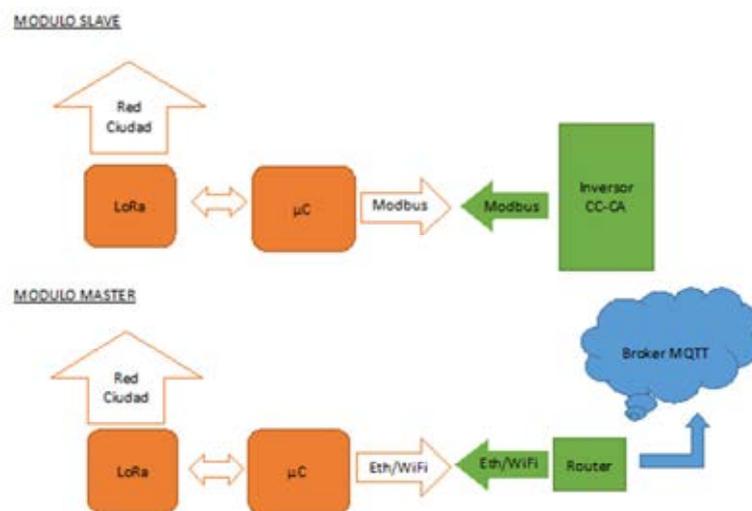


Figura 3: Esquemático de la solución propuesta en hardware.

PRUEBAS REALIZADAS

El primer paso dentro de la implementación de la solución propuesta, fue establecer cuál era el alcance del equipo *LoRa*, con la peor configuración para la comunicación, es decir a nivel del piso, y sin antena potenciada, para tal fin, se programó en un entorno de desarrollo gratuita, uno de ellos transmisor, y otro de ellos receptor, el equipo receptor fue siendo desplazado por el interior del Parque tecnológico Migueletes hasta perder la comunicación, esto se realizó varias veces para establecer desde distintos puntos la máxima distancia de conexión, en la peor condición posible. De esta experiencia, se pudo verificar que la máxima comunicación se dio a aproximadamente 409 m.

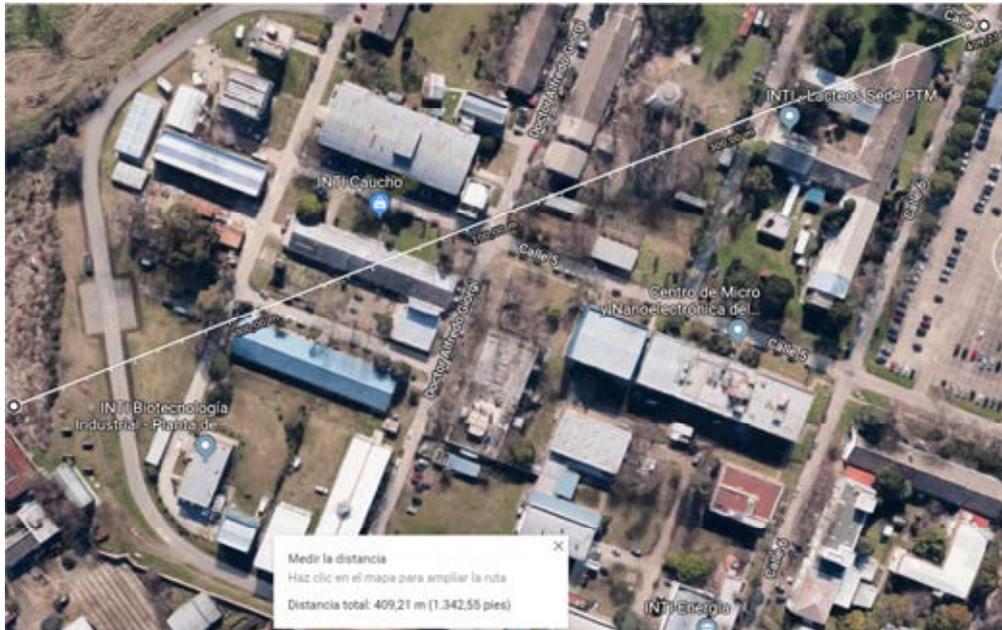


Figura 4: Captura de maps.google.com.ar indicando distancia de alcance y relieve.

En la misma se simuló un envío por parte de uno de los *slaves* de un valor de corriente equivalente a 8.4 A, el mismo fue enviado con dirección destino, *master*.

El protocolo de comunicación base implementado, fue el siguiente:

<SOLICITUD_ENVIO> <ID_DESTINO> <MAGNITUD> <VALOR> <ID_REMITENTE >

Estos valores son irradiados a la atmósfera a la espera de ser tomado por un equipo receptor, si el equipo receptor, no es a quien debe llegar el paquete de datos, simplemente lo replica a la red, hasta que el paquete llegue a destino y ya no vuelva a irradiarse, cuando un paquete es irradiado, los distintos *slaves* deben permanecer en estado de latencia a la espera del arribo de datos, este sistema emula el conocido CSMA/CD, (*Carrier sense multiple access with collision detection*) utilizado en redes LAN,

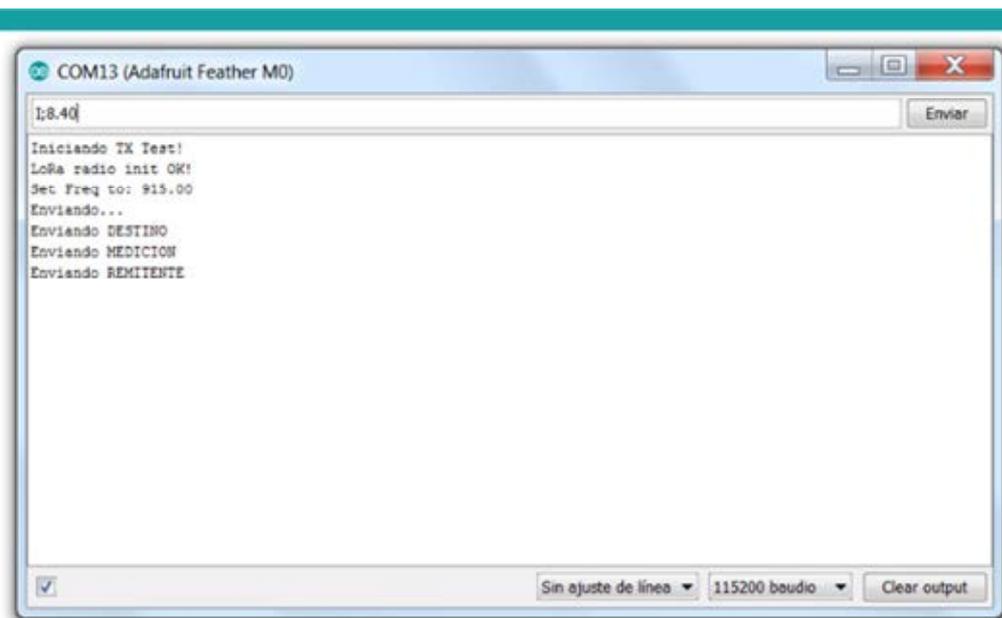


Figura 5: Captura de pantalla de emulador de TX.

Por otra parte, el receptor quien se desplazaba por el parque iba recopilando datos hasta encontrar un punto máximo donde no fue posible desplazarse más consiguiendo establecer una comunicación.

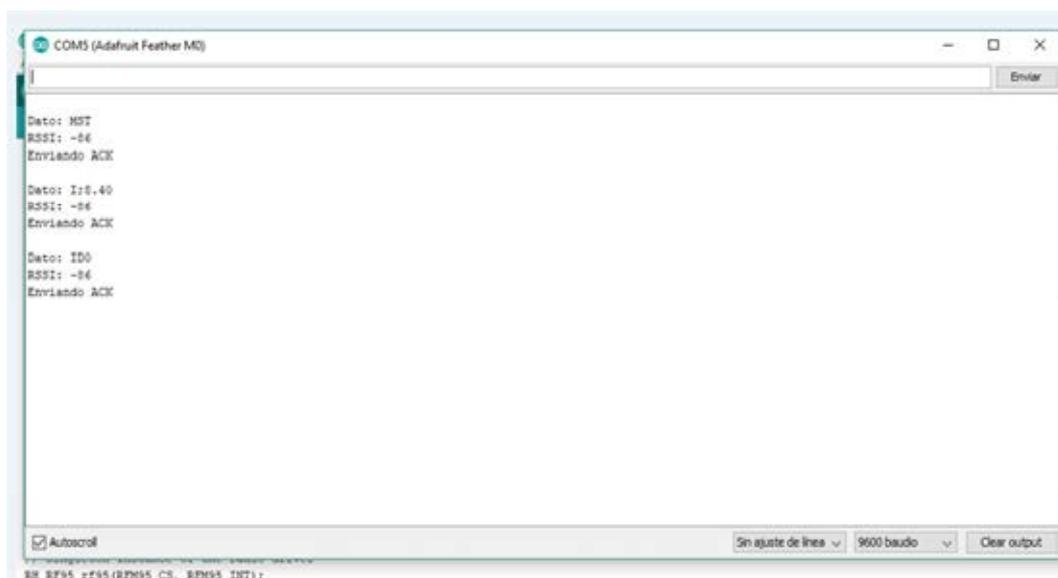


Figura 6: Captura de pantalla de emulador de TX.

Es para destacar que aún con valores muy bajos de RSSI, se logró ligar el TX con el RX, pudiendo observar el arribo del dato, **MST** como paquete que indica destino, **<ID_DESTINO>**, **I;8.40**, como paquete que indica **<<MAGNITUD>** y **<VALOR>**, **IDO**, dato que indica el remitente, **<<ID_REMITENTE >**.

Del mismo modo llegarán los paquetes correspondientes a las demás magnitudes características de la instalación fotovoltaica, energía, potencia, tensión, y cualquier otro parámetro que desee ser monitoreado en tiempo real.

Cabe destacar que el alcance previamente mencionado de 409 m, es en las peores condiciones, lo cual hace suponer que, en condiciones reales de uso, es decir a cielo abierto con irradiando desde los techos de las casas en la localidad de Armstrong, Santa Fé,

De todos modos, esta distancia, no representa la máxima que pueda existir entre uno de los *slaves* y el *master*, dado que todos los equipos *slaves* serán repetidoras de las señales que a ellos lleguen siempre que el dato, no sea para ellos.

El sistema electrónico generará datos, para poder evaluar la eficacia del sistema, en lo referido a la subida de los mismos, se instaló un cliente de protocolo *MQTT* en una computadora personal, para emular los datos que, siendo generador por los inversores, y recolectados por el sistema, luego fueran subidos por el *master*.

En dicha plataforma podrán observarse las mediciones de todos los inversores fotovoltaicos existentes en la ciudad independizándonos de cuál es el protocolo de comunicación *Modbus* hacia el inversor, dado que eso será solución implementado por medio del microcontrolador, adecuando este protocolo respecto a la marca y/o modelo del mismo.

```

Administrator: C:\Windows\system32\cmd.exe
otencia" -m "1250"

C:\Program Files (x86)\mosquitto>mosquitto pub -h "industrial.api.ubidots.com" -
p "1883" -u " " " -t "/v1.6/devices/smartmeter/p
otencia" -m "1050"

C:\Program Files (x86)\mosquitto>mosquitto_pub -h "industrial.api.ubidots.com" -
p "1883" -u " " " -t "/v1.6/devices/smartmeter/p
otencia" -m "950"

C:\Program Files (x86)\mosquitto>mosquitto_pub -h "industrial.api.ubidots.com" -
p "1883" -u " " " -t "/v1.6/devices/smartmeter/p
otencia" -m "1500"

C:\Program Files (x86)\mosquitto>mosquitto pub -h "industrial.api.ubidots.com" -
p "1883" -u " " " -t "/v1.6/devices/smartmeter/p
otencia" -m "1300"

C:\Program Files (x86)\mosquitto>mosquitto_pub -h "industrial.api.ubidots.com" -
p "1883" -u " " " -t "/v1.6/devices/smartmeter/e
nergia" -m "250"

C:\Program Files (x86)\mosquitto>mosquitto pub -h "industrial.api.ubidots.com" -
p "1883" -u " " " -t "/v1.6/devices/smartmeter/p
otencia" -m "1500"

```

Figura 7: Simulación de valores.

Los valores observados en la figura anterior, son producto de la utilización de un simulador de cliente *MQTT*, en este caso *Mosquitto*, quien permite emular valores con formato idéntico al que se utilizará en la red *LoRa* a instalar en la ciudad de Armstrong, dado que al día de hoy los dispositivos no fueron instalados en campo.

Finalmente, y producto del arribo de los valores a la plataforma, los datos serán recopilados en la plataforma previamente mencionada, adquiriendo en su *dashboard* el siguiente aspecto, cabe destacar que para cada inversor o existirá un *dashboard* diferente que se generará automáticamente a medida que más dispositivos se conecten a la red, evitando de esta manera que sea necesario un trabajo extra por parte del operador para crearlos.

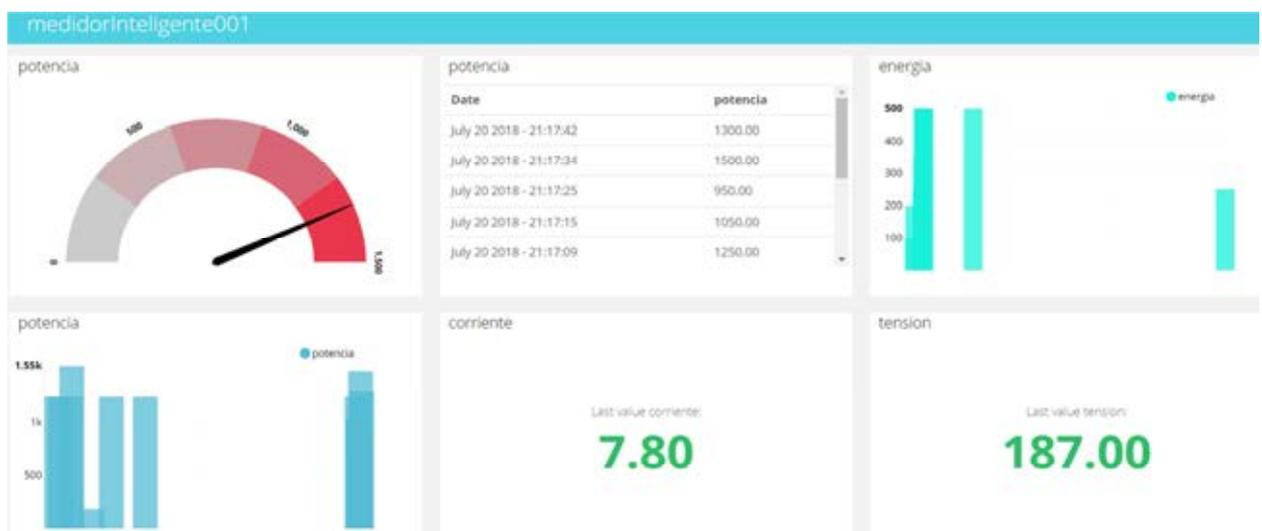


Figura 8: Conformación de *dashboard* final

CONCLUSIONES

Se ha verificado que la distancia máxima a la que se encuentran los inversores fotovoltaicos entre sí, y la máxima distancia entre los inversores y la sede de la cooperativa, donde se encontrará el dispositivo *master*, es menor que la distancia máxima de funcionamiento de los equipos de comunicación.

Se ha podido confeccionar una plataforma integradora de datos de los distintos inversores multimarca de la localidad de Armstrong en Santa Fe, observando que el arribo de los datos es independiente del equipo y/o marca, verificando la misma a través de diversas simulaciones a través de clientes *mosquitto*, utilizando protocolo *MQTT*.

Por lo que, se ha podido verificar que la tecnología LoRa, es correcta para implementar en una red propia respetando las distancias máximas de comunicación, con la posibilidad de integrar los datos dentro de una misma plataforma de información.

La cantidad de datos generados en una red inteligente son enormemente altos en comparación con las redes eléctricas actuales. El gran procesamiento de datos se debe a la gran cantidad de información que es requerida desde y hacia los medidores inteligentes bidireccionales, poder predecir en base a esos datos los usos y costumbres de los usuarios cual es el verdadero perfil de la red.

Por esto, se necesita una infraestructura inteligente para el procesamiento exitoso de datos enormes, si esto no puede ser garantizado la comunicación, puede ser un obstáculo para el despliegue de red inteligente.

La tecnología ayuda a reducir la transferencia de datos de gran tamaño entre usuario y la utilidad a través de una *IP* (protocolo de Internet), y mediante la utilización de protocolos que están orientados justamente a este escenario, es el caso e *MQTT*, que aun corriendo sobre *TCP/IP* y en base a su estructura organizativa a través de un *broker* manejador de este protocolo, permite que la transferencia sea muy simple y amigable al momento de trabajar con estos datos, asociado a esto aparece el concepto de seguridad informática, hoy en día las plataformas de recolección de datos permites establecer un cifrado de seguridad y *token* únicos para cada dispositivo, si a eso se le agrega un sitio seguro <https://> en la mayoría de los casos es casi imposible la vulnerabilidad de la red desde el aspecto informático.

IoT (Internet of Things) es además necesario para promulgar comunicación fluida y efectiva entre los contadores inteligentes fijados en la ubicación del consumidor y los sensores para encender o apagar la dispositivos con respecto a los patrones de carga (S.Sofana Reka et al., 2018), esto sería el sumun de la tecnología de una red inteligente, el del perfil de la red auto gestionable, hoy en día en desarrollo y presente sólo a nivel estudio en laboratorios, dado que una red inteligente no es sólo la que permite a través de ella poder monitorear y controlar sino, además, que la misma se autorregula, es aquí donde el aprender de los datos de recolección cobra una preponderancia altamente significativa.

Existen un sin fin de beneficios para utilizar este tipo de tecnología, que van desde la utilización de un paradigma nuevo, pero con las bases de una tecnología madura, asociada a la gran cantidad de soporte para manejar datos y poder aprender de ellos, además de los beneficios en tiempo real que podían implementarse en la reducción de consumos ociosos de energía, con el aporte extra de poder tener implementada una base en una tecnología que promete ser aún más desarrollada a futuro.

El tener una tecnología capaz de poder vincular distintos dispositivos conectados en una red eléctrica, e independizarnos del fabricante y de los protocolos en los cuales están trabajando, independizarnos a su vez del modo en que los mismos están irradiando o transmitiendo su información, no tiene importancia sólo desde el punto de vista de la recolección de datos y posterior visualización por parte del usuario final y/o administrador, sino que poder contar con toda esta información y tener la posibilidad de diseñar sistemas electrónicos propietarios presenta la posibilidad de poder en base a los datos recopilados, predecir funcionamiento en la red, generando inteligencia autónoma para que esta

mediante un administrador central, se autorregule y administre, adquiriendo finalmente el verdadero sentido de una Red Inteligente.

REFERENCIAS

Norma AEA 92559, Asociación Electrotécnica Argentina, Edición 2017.

Rafael Real-Calvo, Antonio Moreno-Munoz, Victor Pallares-Lopez, Miguel J. Gonzalez-Redondo, Isabel M. Moreno-Garcia, Emilio J. Palacios-Garcia, (2017). Sistema Electrónico Inteligente para el Control de la Interconexión entre Equipamiento de Generación Distribuida y la Red Eléctrica. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 14 (2017) 56–69.

Wixted AJ, Kinnaird P, Larijani H, Tait A, Ahmadiania A, Strachan N. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2016 IEEE SENSORS; 2016 Oct 30–Nov 3; Orlando, FL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016, 40-47.

Yonghua Song, Jin Lin, Ming Tang, Shufeng Dong, An Internet of Energy Things Based on Wireless *LPWAN*, ELSEVIER Engineering 3 (2017) 460–466.

S. Sofana Reka, Tomislav Dragicevic, Future effectual role of energy delivery: A comprehensive review of Internet of Things and smart grid, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 91, August 2018, 90-108

ABSTRACT

This work describes a possible solution, when in the same intelligent electrical network, that operates under different communication standards, and / or under different devices from different companies, which make impossible an integration of the measurements in the same platform in a harmonic and orderly way, which would allow an intelligent software, that works in a superior plane to predict and in this way act against the behavior of the users of the network, based on the learning of the information gathered previously.

The use of technology known as the Internet of Things, makes it possible to turn from an intelligent network that only reports data to one that, based on the analysis of all the data that reaches it, can be self-administered. For the topology of the electrical network and the distribution of the measurement points, in the town of Armstrong, Santa Fé, it has been possible to verify that the LoRa technology is correct to implement in its own measurement network, respecting the maximum distances of communication, with the possibility also of integrating all the measurement data, within the same information platform.

Keywords: solar energy, renewable energy, solar photovoltaic, inverters, smart grids, internet of things.

SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA PANELES FOTOVOLTAICOS

Ramiro A. Echenique¹, Ernesto J. Perino², Luis A. Odicino³, Daniel A. Perelló⁴, Roberto M. Murdocca⁵.

Laboratorio de Electrónica, Investigación y Servicios (L.E.I.S.) - Laboratorio de Energía Solar y Medio Ambiente - Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales -U.N.S.L.
Tel. 2664530000-int. 6119, e-mail: Ra.echenique@gmail.com, ejperino@unsl.edu.ar, laodicino@hotmail.com, adp2006@gmail.com, mmurdocc@unsl.edu.ar.

Recibido 13/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: El objetivo del presente trabajo es desarrollar un seguidor solar de dos ejes para ser aplicado a paneles fotovoltaicos. Esta aplicación permite que el panel incremente su producción en un 20 a 30%, dependiendo del mes y la hora del día. El sistema desarrollado contempla 5 modos de funcionamiento. Se utilizó una placa Arduino Mega ya que esta satisface los requerimientos de memoria y potencia de cálculo requeridos. Se usaron sensores LDR para el posicionamiento; además, el sistema contempla la posibilidad de conectarse mediante telefonía celular. Para el modelo a escala se usaron servomotores marca Tower Pro modelo SG90 por sus bajos requerimientos energéticos que permiten modularizar el sistema. Se realizaron simulaciones donde el error resultante es inferior al 1% para el posicionamiento y el aumento de energía producida está dentro de los valores esperados. Se proponen mejoras en el software de manera de hacerlo más accesible.

Palabras clave: seguidor solar, paneles fotovoltaicos, energía solar, Arduino, tecnología.

INTRODUCCION

Un seguidor solar, es un dispositivo capaz de orientar sus paneles de forma que estos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares a lo largo de la jornada.

Existen básicamente dos tipos de seguidores solares según su rango de movimientos: de un eje con un único grado de libertad (horizontal, vertical u oblicua) y, de dos ejes con dos grados de libertad, posibilitando un seguimiento solar más preciso. En la Figura 1 se muestran ambas posibilidades. En el presente trabajo se optó por el de dos grados de libertad.

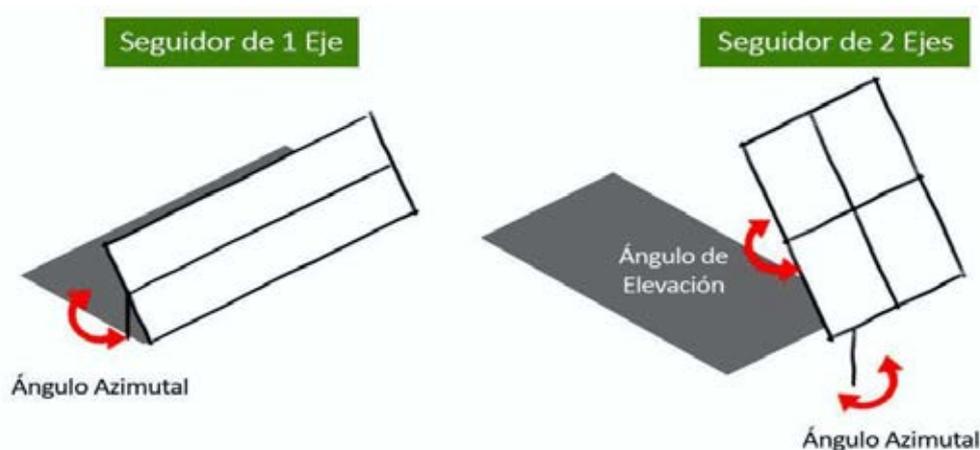


Figura 1: Esquema de seguimiento solar.

¹Profesional Independiente

²Investigador U.N.S.L.

³Investigador U.N.S.L.

⁴Investigador U.N.S.L.

⁵Investigador U.N.S.L.

Se desarrolló un prototipo económico con componentes de bajo costo y con disponibilidad en el mercado local. Dicho prototipo cuenta con un registro de datos (Datalogging) que le permite almacenar la información recolectada. Una vez configurado, puede hacer un seguimiento solar de manera desatendida y automática. Además, cuenta con la posibilidad de actualizar el firmware, lo que le proporciona entre otras cosas la adaptación mecánica y el tipo de motores que se pueden emplear. Por último y, no menos importante, se puede apreciar que el prototipo cuenta con un programa que, mediante una aplicación, puede ser manipulado desde un Smartphone, brindando practicidad y versatilidad.

Entre las metas se destacan:

El sistema deberá ser totalmente autónomo.

Deberá poseer independencia de la ubicación geográfica: se ingresa latitud y longitud del lugar de operación.

El enfoque del dispositivo presentará un error máximo de $\pm 3^\circ$.

El sistema deberá estar optimizado en cuanto al consumo energético.

MODOS DE OPERACIÓN

El sistema permitirá 5 modos de operación, denominados A, S, M, E y O, se detallan a continuación:

Modo A: cálculo automático de la trayectoria; modo S: utilización de sensores; modos M: combinación de modo A y S; modo E: emulación solar; y modo O: apagado del seguidor solar.

Para poder efectuar los cálculos se emplea el modo A; en él, el prototipo requiere de las coordenadas geográficas del lugar donde se encontrará (latitud y longitud), la fecha del año y hora del día. A partir de dichos datos de entrada, el sistema calcula las coordenadas del sol y acciona los servomotores, orientando el panel perpendicularmente a la radiación solar. Adicionalmente el procesador gestiona las lecturas de los paneles fotovoltaicos y las guarda en un archivo, como se esquematiza en la Figura 2.



Figura 2: Diagrama del sistema modo A

Para el cálculo de la trayectoria se implementaron las ecuaciones propuestas por Muhammad Iqbal.

Cálculo de la declinación:

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) (180/\pi) \quad (1)$$

Donde Γ , en radianes, se denomina ángulo diario y está expresado por:

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (2)$$

Cálculo para la corrección del tiempo

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) (229.18) \quad (3)$$

El modo S consiste en dirigir el soporte mecánico del seguidor solar a través de la lectura de sensores. El procesador interpreta esas lecturas y acciona los motores para que el dispositivo quede orientado hacia el sol. El mismo, también toma la lectura de los paneles y las almacena en un archivo. En la Figura 3 se observa el diagrama en bloques de este modo.

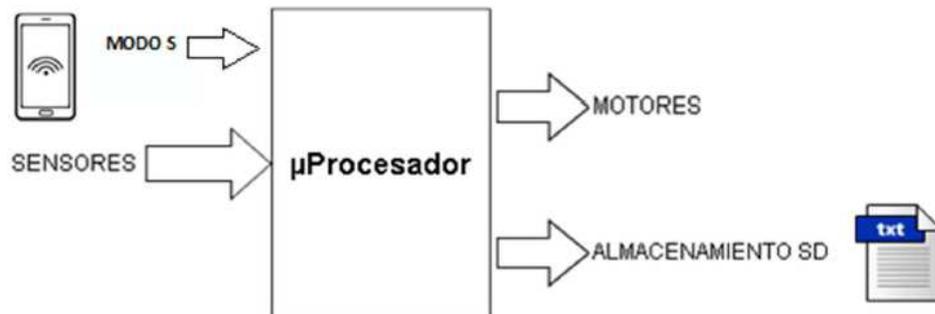


Figura 3: Diagrama del sistema modo S

El modo M o mixto es una combinación de los dos modos anteriores (A y S). En cada intervalo de tiempo (10 minutos) el procesador calcula la ubicación del sol. Luego, en ese instante, mediante la lectura de los sensores realiza un ajuste, repitiendo el ciclo mientras permanece en dicho modo. Esto se observa en la Figura 4 a) y b).

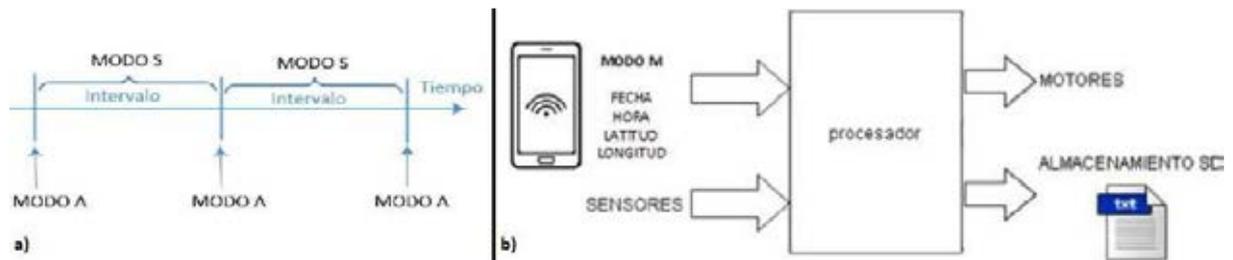


Figura 4: Diagrama del modo M

El modo E emula el movimiento solar en un corto lapso de tiempo, en el cual se modifica la hora más rápido que en su funcionamiento normal. Se hace uso del modo A. Emula un recorrido diario en 2 minutos aproximadamente (depende de la duración del día actual).

El modo O u off, consiste en llevar los motores de cada eje a una posición inicial pre-establecida.

Desarrollo

Diagrama en bloques general del sistema

El sistema consta de 3 partes bien diferenciadas, como se ilustra en la Figura 5:

Plataforma móvil.

Placa electrónica.

Celular o Tablet con la aplicación.

La primera consta básicamente de un soporte mecánico donde se monta el panel solar, los motores y los sensores; esta parte es la adaptable a la instalación que se desea realizar.

La segunda es donde se centra el proyecto y es la encargada de controlar los movimientos de la plataforma móvil para lo cual usa sensores y ecuaciones astronómicas, según sea el modo de operación. Utiliza un reloj en tiempo real para obtener precisión en los cálculos y una memoria externa para almacenar datos referidos a los paneles solares.

La tercera parte es el dispositivo móvil con la aplicación del seguidor solar, este tiene la función de configuración y monitorización del sistema. El sistema tiene la comodidad de realizar las configuraciones de manera inalámbrica y la posibilidad de utilizar cualquier dispositivo Android para esto.

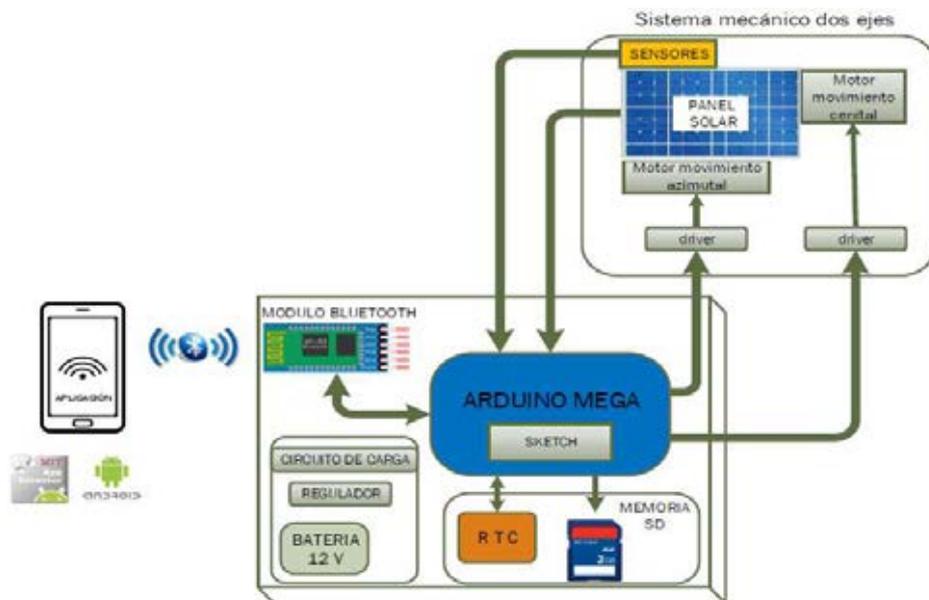


Figura 5: Bloques y dispositivos principales del seguidor solar

Hardware

Se describe a continuación el hardware utilizado en el presente trabajo.

Arduino

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto, basada en una sencilla placa con entradas y salidas analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing. Pueden conectarse placas de expansión (shields), que brindan versatilidad de funcionamiento de la placa. Se han desarrollado varias versiones de Arduino debido a que es una plataforma de código abierto.

Más precisamente, Arduino Mega está basado en el micro controlador ATmega2560. Tiene 54 pines de entradas/salidas digitales (14 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serial por hardware), cristal oscilador de 16 MHz, conexión USB, jack de alimentación, conector ICSP y botón de reinicio. El Arduino Mega es compatible con la mayoría de las placas de expansión (shields) diseñados para Arduino Duemilanove, Diecimila o UNO.

Posee las siguientes especificaciones técnicas:

Procesador: ATmega2560

Voltaje Operativo: 5V

Pines digitales de entrada/salidas: 54 (de los cuales 15 proveen salida PWM)

Entradas analógicas: 16

Capacidad de corriente por pin: 40 mA

Memoria Flash: 256 KB (8KB son empleado por el bootloader arduino)

Memoria SRAM: 8 KB

Memoria EEPROM: 4 KB

Velocidad del reloj: 16 MHz

Se utilizó la placa Arduino Mega, principalmente, por poseer un potente procesador para realizar cálculos complejos en punto flotantes, suficiente memoria para poder llevar a cabo dichos cálculos y demás procesos, la versatilidad de tener varias UART, la cantidad necesaria de pines de entrada/salida para abastecer el presente proyecto y su amplia disponibilidad en el mercado local.

Reloj de Tiempo Real y Memoria de almacenamiento SD.

Para este proyecto se utilizó un shield del tipo 2 en 1 para simplificar la circuitería, el cual incluye un Reloj de Tiempo Real (RTC) y un lector de memorias SD.

La placa elegida es del fabricante Deek Robot en su modelo Data LoggingShield V1.0.

Esta placa tiene las siguientes características: Interface para tarjetas SD: en los sistemas de archivos FAT 16 y FAT 32. Reloj en Tiempo Real basado en el integrado DS 1307 de Maxim (reloj más fiable

que el interno de Arduino). Portabatería incluido para mantener fecha y hora actualizada (hasta dos años), incluso con Arduino desconectado. Regulador de 3.3V para alimentar la tarjeta SD. En el seguidor solar un reloj en tiempo real seguro (DS 1307) es muy importante, ya que las ecuaciones de trayectoria basan su cálculo en la fecha y hora de cada día para ir calculando la posición del Sol. Por otro lado, al tener integrado un lector de memorias SD se pueden ir registrando cada cierto intervalo el nivel de voltaje de los paneles solares entre otras cosas.

Sensores de posición solar.

Para el posicionamiento en el modo S se emplearon sensores LDR (Light Dependent Resistor), que consiste es una resistencia variable en función de la luz incidente sobre su superficie. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz que incide en la superficie del LDR menor será su resistencia y cuanto menos luz incida mayor será su resistencia. Para el presente proyecto se dispusieron 4 sensores LDR, uno para cada cuadrante (superior derecho e izquierdo, inferior derecho e izquierdo), como se ilustra en la Figura 6.



Figura 6: Distribución de los LDR.

El sistema siempre lleva a que los 4 sensores tengan la misma intensidad de luz, lo que indica que el panel está orientado hacia el sol. Las señales acondicionadas provenientes de cada LDR son leídas en entradas independientes del Arduino Mega, el cual realiza cálculos y ejecuta los movimientos de los servomotores.

Comunicación mediante módulo bluetooth HC-05.

Este módulo realiza la comunicación entre el Smartphone y el Arduino del seguidor solar. Los parámetros enviados desde el celular hacia Arduino Mega, a través del módulo bluetooth HC-05, son: fecha, hora, latitud, longitud, modos de funcionamiento. Los enviados desde Arduino son: los estados y los cálculos realizados.

Movimiento mediante servomotores.

Para el desplazamiento del sistema se emplearon dos servomotores, uno en cada eje. El servomotor consiste en un motor eléctrico, un juego de engranes, un potenciómetro y una tarjeta de control, todo dentro de una carcasa de plástico, la cual recibe una señal PWM (Pulse Width Modulation), la que controla la dirección y posición del servo entre 0° y 180°. En el proyecto solo se utilizan 90° del movimiento cenital y 180° del azimutal. Los servomotores utilizados en el modelo a escala son los SG90 de Tower Pro. Son micro servos de 9 gramos y sus requerimientos energéticos son bajos.

En la Figura 7 se muestra el circuito de conexión de los servomotores SG90. Se utilizaron los pines 44 y 45 (ambos PWM) como señales de control para el movimiento vertical y horizontal respectivamente. Se usó un regulador de voltaje 7805 para mantener una tensión de alimentación en los servos estable, la tensión V_{in} es la alimentación de todo el sistema es de 12V.

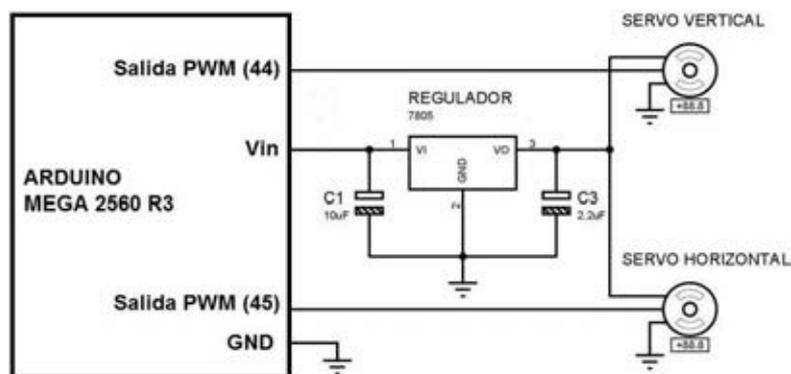


Figura 7: Diagrama de conexión de servomotores.

Cargador solar.

Su función es controlar constantemente la tensión de la batería, cuando está por debajo de cierto nivel de tensión (11,5V), el control de Arduino activa el circuito de carga que conecta el panel FV de 18V.

Software

IDE Arduino

Dado que el Arduino es una placa que ejecuta una serie de códigos previamente introducidos, se necesita un programa denominado IDE (Integrated Development Environment o Entorno de Desarrollo Integrado) para cargar dichos códigos. Este IDE, instalado en una PC, es un entorno muy sencillo de usar y en él se escribe el programa a ejecutar por Arduino. Una vez escrito, se carga a través del puerto USB y Arduino comenzará a trabajar de forma autónoma.

Estructura de programación

La estructura básica de un proyecto en Arduino es bastante simple y se compone de al menos dos partes: `setup()` y `loop()`. Ambas partes son obligatorias y encierran los bloques de instrucciones. El `setup()` es la parte encargada de la configuración y el `loop()` es la que contiene el programa que se ejecutará cíclicamente. Ambas funciones son indispensables para la correcta ejecución del programa.

La función de configuración (*setup*) realiza la configuración e inicialización de los elementos, y sólo se ejecuta una vez, justo después de reiniciar (o cuando se energiza), y no vuelve a ejecutarse hasta un nuevo reinicio. La función de lazo (*loop*), que se ejecuta inmediatamente después de `setup`, contiene el código que se ejecutará continuamente (lectura de entradas, activación de salidas, etc). La función `loop()` es el núcleo de los programas y se usa para el control activo de la placa Arduino.

Los elementos principales de un programa o sketch de Arduino son: Variables (espacio de memoria donde se almacenan datos variables); Funciones (trozos de código que pueden ser llamadas desde cualquier parte del sketch); `setup()` y `loop()` (funciones especiales y obligatorias de todo sketch); Librerías (conjunto de funciones pre creadas por terceros que pueden importarse en el código); Comentarios (para documentar el proyecto). La Figura 8 exhibe el sketch básico de Arduino.

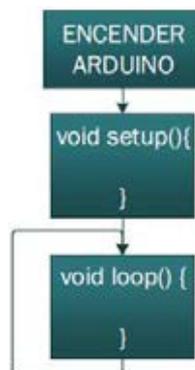


Figura 8: Diagrama de flujo básico de un sketch en Arduino.

Programación del seguidor solar.

Debido al hardware utilizado en el proyecto se requieren de librerías especiales para poder acceder a cada una de sus funciones. Las librerías utilizadas son: `Wire.h` maneja la comunicación del bus I²C entre el DS1307 y el Arduino. Viene por defecto añadida a la IDE; `RTClib.h` se apoya en la librería `Wire.h` y permite obtener y establecer el tiempo del RTC del DS1307; `SPI.h` para el manejo y funcionamiento del bus SPI (Serial Peripheral Interface), permitiendo comunicar los dispositivos SPI, con el Arduino como maestro; `SD.h` permite leer y escribir en tarjetas SD; `Servo.h` es una librería estándar en Arduino y sirve para el control de servomotores; `Math.h` es para cálculos matemáticos, incluye un gran número de funciones útiles para manipular números en punto flotante.

Además, el presente proyecto se encuentra organizado y estructurado mediante el uso de funciones. Esto permite realizar tareas repetitivas y generar una programación más flexible, ordenada e intuitiva.

Para el programa de control del seguidor solar se desarrollaron las siguientes funciones: Parámetros, Temporizadores, Día del año, Tarjeta SD, Temporizador PI (temporizador de posición inicial) y Modos (Modo Automático, Modo Sensor, Modo Emulador y Ubicación inicial).

En la Figura 9 se muestra un diagrama de flujo de `setup()`. Éste sólo se ejecuta una vez al energizar o resetear el Arduino. Al comienzo se declaran todas las variables globales que se van a utilizar tanto en el `setup()`, `loop()` o en cualquier de las funciones anteriormente mencionadas. En la función `setup()` se configuran e inicializan los módulos SD y RTC.



Figura 9: Diagrama de flujo de `setup()`.

En la Figura 10 se exhibe el diagrama de flujo de `loop()`, el cual se detalla a continuación.

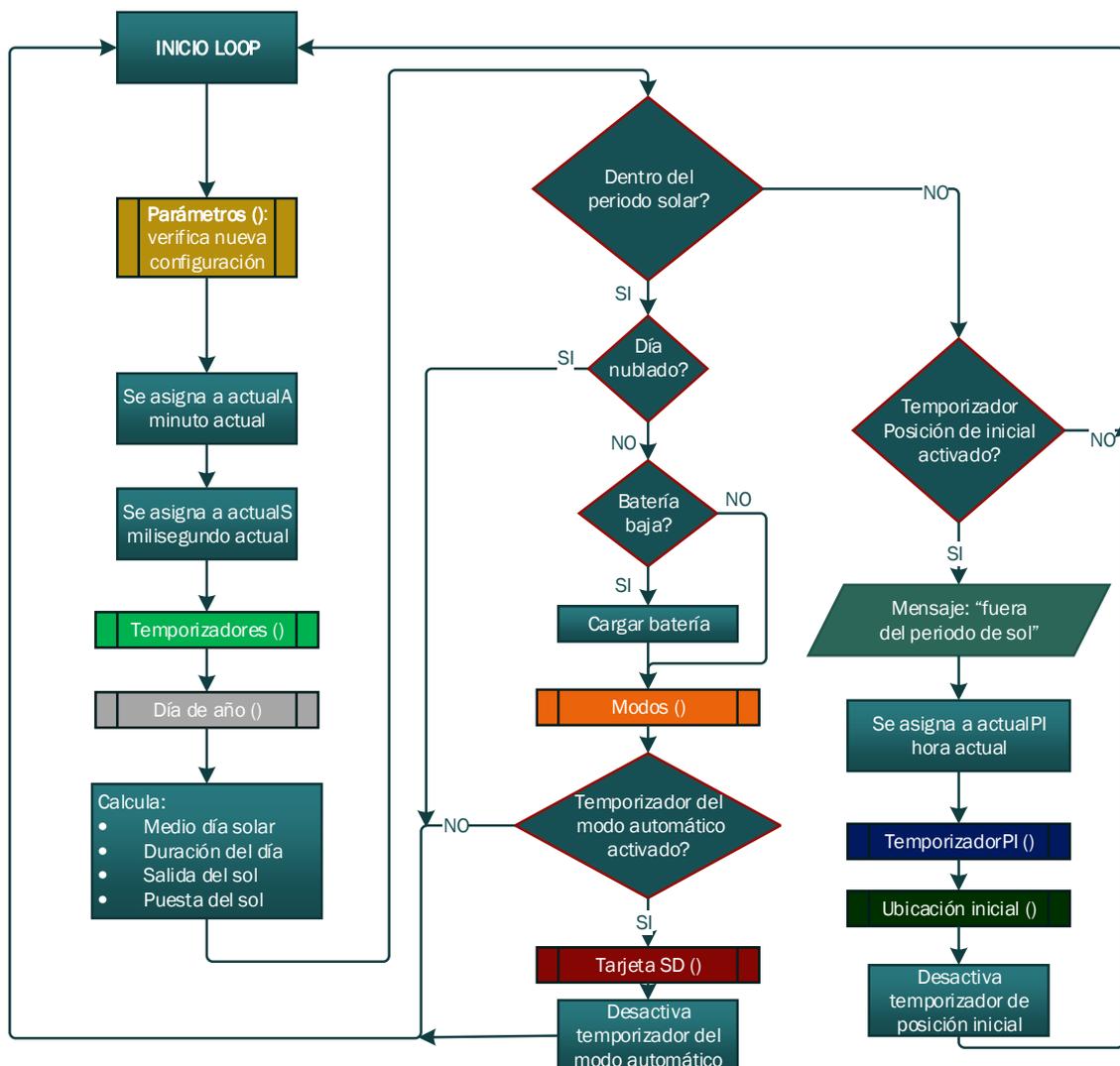


Figura 10: Diagrama de flujo del `loop()`.

Dentro de la función `loop()`, la primera tarea es verificar si el usuario ha enviado alguna nueva configuración, mediante el llamado a la función `parámetros`. También actualiza las variables (*actualA* y *actualS*) de los temporizadores principales y los inicializa, tanto para el modo automático como el modo sensor. A continuación, calcula el día del año mediante la función `Día del año ()`, esto es necesario para el cálculo de la trayectoria. Realiza los cálculos matemáticos de la puesta y salida del Sol de cada día, estos datos son necesarios para obtener el lapso del sol en el horizonte, que en definitiva determina el periodo de trabajo del seguidor solar. Si la hora actual se encuentra en este rango, primero verifica si el día está muy nublado, si es así no realiza ninguna otra acción hasta que se despeje. Si el día está despejado, el siguiente paso es verificar el estado de la batería y si su nivel es bajo comienza la carga de la misma. Una vez comprobado estos dos estados anteriores llama a la función `Modos ()`, para realizar las distintas tareas según el modo configurado (A, S, M, E y O). Si el temporizador del modo automático se encuentra activado realiza la grabación en la tarjeta SD de las lecturas de los paneles solares.

Fuera de este intervalo de tiempo, lleva el seguidor solar a una posición inicial por única vez y se queda a la espera de que comience un nuevo periodo solar (día siguiente).

Interfaz de usuario.

En este caso se decidió realizar como interfaz una aplicación para Smartphone o Tablet que funciona bajo el sistema operativo Android. Para el desarrollo de la aplicación se utilizó App Inventor 2 que es un entorno de desarrollo de aplicaciones para dispositivos Android del Instituto Tecnológico de Massachusetts y de un equipo de Google Education. App Inventor 2 es un lenguaje de programación basado en bloques, y orientado a eventos.

Aprovechando las características actuales de los teléfonos o tablets, se desarrolló una aplicación que crea un menú interactivo para el usuario del seguidor solar.

Dicha aplicación emplea 5 recursos: Sensor de ubicación para obtener la latitud y longitud; Cliente bluetooth para realizar la comunicación entre ambos dispositivos (smartphone y seguidor solar); 2 relojes temporizadores, uno para refrescar continuamente los datos del sensor de ubicación y el otro para borrar cada 10 segundos el monitor; Notificador para informar cuando se ha conectado y desconectado correctamente.

La aplicación toma automáticamente del dispositivo (celular o tablet) los datos necesarios para los cálculos de la trayectoria solar como son sus coordenadas geográficas (latitud y longitud), la fecha y la hora actual.

Como se muestra en la Figura 11a, el usuario puede elegir entre 5 modos de funcionamiento: Automático, realiza cálculos de la trayectoria; Sensor, utiliza sensores LDR para su posicionamiento; Mixto, combina los modos Automático y Sensor; Emulación Solar, simula el movimiento diurno de sol desde la puesta hasta el ocaso; Apagar Seguidor Solar, lo lleva a su posición inicial. Luego el usuario debe presionar “*Enviar a Seguidor Solar*” para que la aplicación envíe las órdenes y parámetros al prototipo y este pueda realizar la tarea solicitada.

Para corroborar que el prototipo esté operando correctamente, la aplicación posee un monitor serie, como se exhibe en la Figura 11 b. El prototipo informa los cálculos y modos de funcionamiento a través de este monitor. El mismo borra sus datos automáticamente cada 10 segundos, pero además posee un botón para borrar manualmente los datos que se reciban.



Figura 11: Modos y Monitor en la aplicación.

Resultados

Diferencia de cálculo entre Planilla de Cálculo y Arduino Mega.

Se realiza una comparación entre los cálculos hechos mediante una Planilla de Cálculo (Excel, Origin, etc.) y los obtenidos con el Arduino Mega 2560, para el ángulo de inclinación o altura solar y para el ángulo azimut. Se tomó como muestra un día aleatorio durante el periodo de Sol, desde el alba hasta el ocaso. En la figura 12 se representa el porcentaje de error de la altura solar calculada a partir de una Planilla de Cálculo y de Arduino Mega, los cuales no superan el 0.5 por ciento.

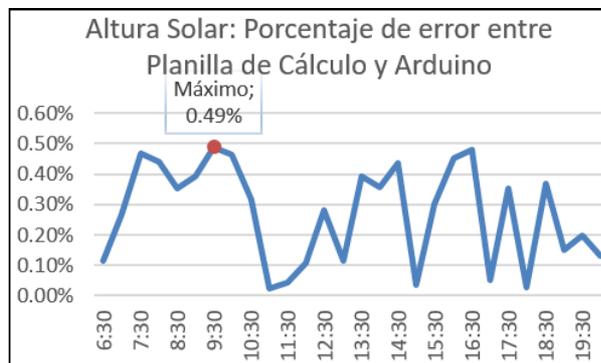


Figura 12: Variación del porcentaje de error de la altura solar entre Planilla de cálculo y Arduino.

En la figura 13 se representa el porcentaje de error del ángulo azimut calculado a partir de una Planilla de Cálculo y de Arduino Mega, los cuales no superan el 0.5 por ciento.

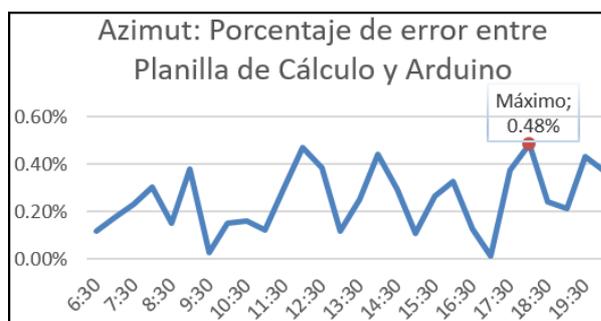


Figura 13: Variación del porcentaje de error azimutal entre Planilla de cálculo y Arduino.

Comparación entre un sistema fijo y este seguidor solar de dos ejes.

Se realizó una comparación entre un sistema fijo con respecto al seguidor solar de este proyecto. Para estas pruebas se montó adicionalmente un panel solar fijo orientado al norte y con una inclinación óptima para San Luis en el período estival. Además, para realizar una comparación correcta, ambos paneles empleados poseen las mismas características.

En la Figura 14 muestra una medición en el modo cálculo Automático de la trayectoria. Se observó mayor diferencia (24% y 30% en el voltaje) al comienzo y al final del día respectivamente, entre el panel con seguidor solar y el fijo. Cerca del mediodía solar, las diferencias entre las lecturas del panel fijo y el móvil con seguidor solar, disminuyen al 8% aproximadamente.

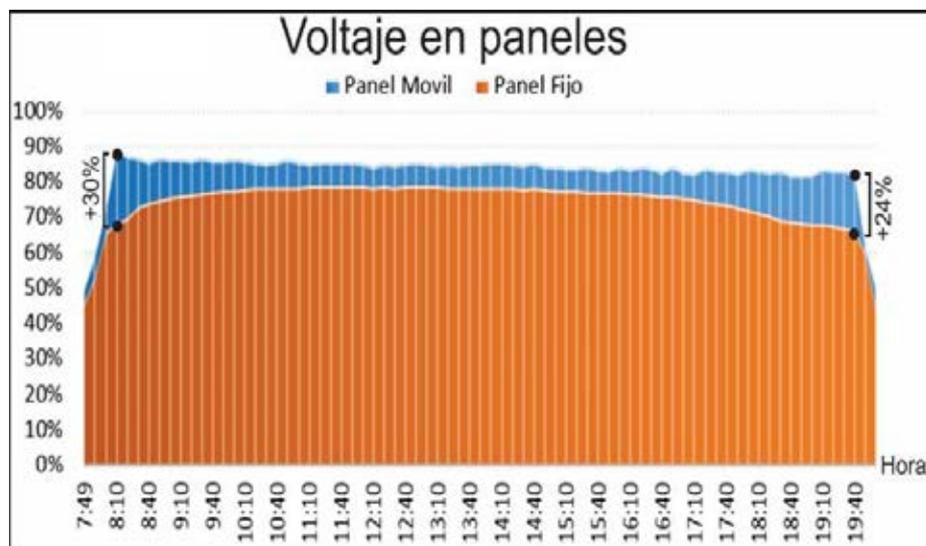


Figura 14: Comparación del voltaje medido en un panel fijo respecto de uno con el seguidor solar en modo A.

CONCLUSIONES

El objetivo del proyecto fue realizar un prototipo que pueda seguir el Sol en forma desatendida. Por medio de una placa Arduino Mega y el software IDE de Arduino, se desarrolló un sistema de seguimiento (hardware + software) que satisface las expectativas, ya que el dispositivo funciona de forma autónoma e independientemente de la ubicación geográfica.

Se puede concluir que el micro controlador de Arduino Mega es capaz de realizar los cálculos de punto flotante con gran precisión y sin inconvenientes.

El programa implementado posee la flexibilidad de adaptarse al sistema mecánico, ya que posibilita cambiar tanto el tipo de servomotor como el soporte mecánico.

Se logró una interfaz de usuario amigable y flexible bajo el sistema operativo Android. De esta manera se realizó un proyecto completo, que abarca desde el control del seguidor solar hasta el almacenamiento de datos. Además, suministra la versatilidad y comodidad de comunicarse con un dispositivo Android de forma inalámbrica.

Los resultados obtenidos abalan que el seguidor solar de dos ejes desarrollado obtiene mejores prestaciones energéticas respecto de un sistema fotovoltaico con paneles fijos. Se prevé instalar cuatro paneles solares idénticos en las instalaciones del Laboratorio de Energía Solar, dos con el seguidor propuesto y dos fijos.

REFERENCIAS

- Muhammad Iqbal, "An Introduction to Solar Radiation" - Academic Press, 1983.
- F. Grassi, G.M Salum y J.C. Ansaldi, "Diseño de un Seguidor Solar de dos ejes parametrizado por PC", ASADES 2012.

Andrés Escobar Mejía, Holguín Londono y Osorio, “Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico”, Scientia et Technica Año XVI, No 44, abril de 2010. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

Perez García M. A., Anton Álvarez J. C., Campo Rodríguez J. C., Grillo Ortega G. J., “Instrumentación Electrónica”, Ed. THOMSON, 2004.

SanDisk Corporation, “SanDisk Secure Digital Card” - Versión 1.9. Nota de Aplicación.

Nathan Waddington y Russell Taylor, “Arduino & Open Source Design”.

Alasdair Allan, “Make: Bluetooth. Bluetooth LE Projects with Arduino, Raspberry Pi, and Smartphones”, maker media, 2015

Sitio oficial de la plataforma Arduino. <https://www.arduino.cc/>

Ing. Noel M. Toranzo, Dra. Ania L. Cervantes, Ing. Leandro L. Oro Carralero, Lic. Jorge Bonzon H., Ing. Orlando E. Costa, “Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar”, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, Energética vol.36 no.2 LaHabana Mayo. Ago. 2015.

SUMMARY: The objective of the present work is to develop a two axis solar tracker to be applied to photovoltaic panels. This application allows the panel to increase its production by 20 to 30%, depending on the month and the time of day. The developed system contemplates 5 modes of operation. An Arduino Mega board was used as it satisfies the required memory and computing power requirements. LDR sensors were used for positioning; In addition, the system contemplates the possibility of connecting by cellular telephony. For the scale model, a Tower Pro model SG90 servomotors are used for their low energy requirements that allow modularizing the system. Simulations were carried out where the error was less than 1% for the positioning and the increase of the energy produced within the expected values. Improvements are proposed in the software in order to make it more accessible.

Keywords: solar tracker, photovoltaic panels, solar energy, Arduino, technology.

SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES PARA HELIÓSTATO

R. Casimiro, M. Gea, D. Hoyos y C. Placco

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta

e-mail: rsc9421@gmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 21/09/18

RESUMEN: Se presenta el desarrollo de un sistema de seguimiento solar en dos ejes para el control del movimiento de los heliostatos de un horno solar para tratamiento de minerales a altas temperaturas. A partir de un análisis utilizando geometría solar se encontraron las ecuaciones que determinan las posiciones angulares de azimut e inclinación de los reflectores para cada instante. Se elaboró una rutina de cálculo que utiliza estas ecuaciones y permite controlar el movimiento de motores paso a paso. Se diseñó y construyó un sistema electrónico para el control numérico de los pasos de los motores para el seguimiento solar y para rebatimiento del plano ante alarma de ráfagas de viento intensas. Se ensayó el sistema a través de un prototipo de pequeña escala.

Palabras clave: energía solar, seguidor de dos ejes, heliostatos.

INTRODUCCIÓN

Para las empresas mineras de la Puna, localizadas lejos de la red de gasoductos, el desarrollo de sistemas productivos que involucren procesos térmicos está limitado, debido al alto costo de transporte de los combustibles. A su vez, estas plantas están ubicadas en una de las regiones con mayor insolación del mundo, la Puna de Atacama, lo que hace que la energía solar sea el principal recurso energético local.

La empresa Ulex S.A. en su planta en la mina Sol de Mañana en el Departamento de Los Andes, provincia de Salta, construyó y ensayó un primer prototipo de horno solar. El mismo está formado por un conjunto de heliostatos (grandes espejos planos) que reflejan la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico, y éstos, a su vez, sobre un recinto térmico, donde se procesa el mineral a alta temperatura (figura 1). La eficiencia de este equipo es baja debido a que se trata de un prototipo básico, con componentes artesanales y control manual (sin seguidores solares automáticos). Sin embargo el sistema permitió probar que se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 500 °C, lo que permitió realizar las primeras experiencias de separación y concentración de colemanita (borato de calcio) mediante calcinación y decrepitación del mineral.

La comprobación, a partir de estos ensayos preliminares, de que es posible disponer de energía solar térmica para procesos industriales de alta temperatura en la propia localización de la explotación, abre nuevas posibilidades de agregar valor económico a algunos minerales de importancia en la producción regional, como es el caso de algunos boratos y de la perlita. Los mismos poseen un alto contenido de agua en su estructura y, cuando son calentados hasta altas temperaturas la liberan, mejorando sus propiedades desde el punto de vista comercial.

Trabajo parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta



Figura 1: Primer prototipo de horno solar en la Puna salteña. Espejos planos reflejando la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico.

El trabajo presentado en este artículo se encuentra enmarcado en un proyecto que tiene como objetivo el desarrollo de la tecnología de Horno Solar a través de la construcción y optimización de un prototipo de concentrador solar térmico. Éste consiste en un sistema formado por un conjunto de heliostatos que concentran la radiación en un reflector secundario. En el foco de este reflector se ubica un recinto térmico que alcanza las temperaturas requeridas para el procesamiento del mineral contenido en su interior (figura 2). Un componente clave del horno solar es el seguimiento solar automático de los heliostatos.

El desarrollo es llevado adelante por investigadores de la Universidad Nacional de Salta en conjunto con personal de una empresa minera que posee una planta productora de boratos en la Puna salteña, donde se localizará el prototipo industrial.

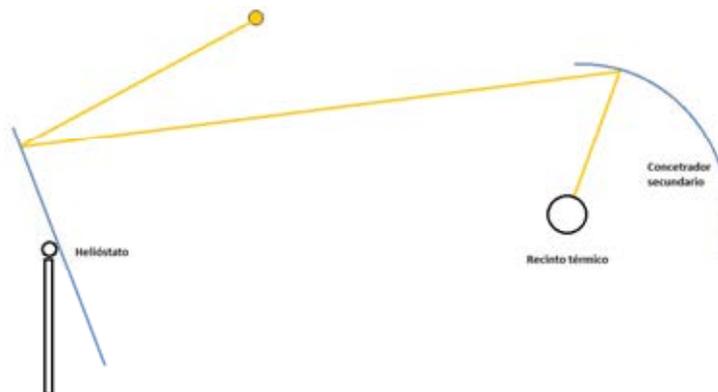


Figura 2: Esquema de un Horno Solar de alta temperatura

A fin de comenzar a desarrollar un prototipo industrial para la transferencia de tecnología, se plantea la construcción y análisis de un heliostato cuadrado de 3 m de lado, constituido por 8 facetas (figura 3). Tanto los marcos externos como los bastidores de las facetas fueron construidos con caño estructural. Cada faceta está vinculada a la estructura del heliostato mediante cuatro tornillos regulables que permiten dar una orientación distinta a cada una para lograr un grado de concentración inicial (canteo). Se encuentra en construcción el sistema mecánico de seguimiento que estará conformado por dos motores paso a paso, del tipo Nema 23, y dos reducciones 1:100 para los movimientos de rotación alrededor de los ejes horizontal y vertical.

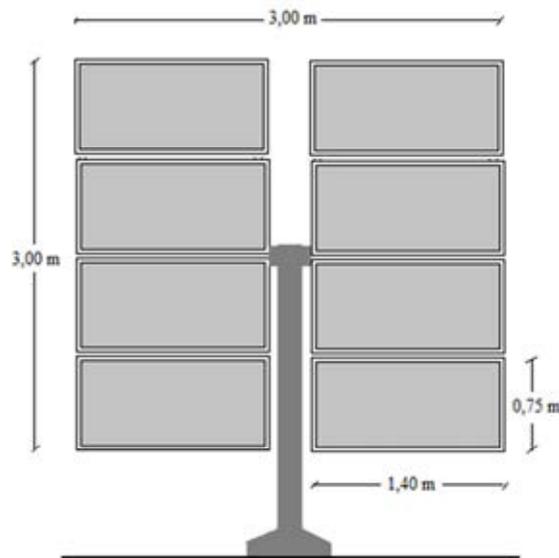


Figura 3: Esquema del heliostato de 8 facetas

FUNCIONAMIENTO DEL SEGUIDOR SOLAR

El diseño de un sistema de seguimiento solar debe contar algunas características importantes como: precisión, durabilidad, fiabilidad, facilidad de mantenimiento y costo accesible. Un concepto de seguimiento es el que plantea ubicar la posición del sol en base a sensores de luz LDR duales (Wang & Lu, 2013; Ponniran et al., 2011). Este tipo de rastreadores enfrenta muchos problemas porque las mediciones del sensor de luz se ven afectadas por el polvo, excrementos de pájaros, nubosidad parcial o luz reflejada por el vidrio de las ventanas de los edificios (Al Naima et al., 2013).

Para resolver este problema, se desarrollan sistemas que ubican la posición del sol utilizando microcontroladores que utilizan ecuaciones astronómicas. Estos sistemas leen periódicamente la hora y la fecha de un controlador en tiempo real, y detectan la ubicación por GPS (Al Naima et al., 2012; Rizal et al., 2012).

Existen distintos tipos de mecanismos para el seguimiento solar. Según el tipo de movimiento que realicen, pueden ser de uno o dos ejes (grados de libertad). Las altas temperaturas involucradas en los procesos térmicos del horno solar exigen óptimos niveles de eficiencia óptica en el proceso de concentración de la radiación, minimizando las pérdidas por *desbordamiento de flujo*. En esta eficiencia influye principalmente la precisión de la orientación de los heliostatos por lo cual es necesario la implementación de seguidores en dos ejes con programación astronómica. En este tipo de seguidores existen dos grados de libertad: la rotación alrededor de un eje vertical, definida por el ángulo azimutal (γ_p) y la rotación alrededor de un eje horizontal, definida por el ángulo de elevación (β) del heliostato (figura 4).

Los seguidores de dos ejes, azimut - elevación, de programación astronómica, están asociados a costos elevados por el uso de dos motores, reductores y porque tienen cierta complejidad en su algoritmo. Sin embargo su utilización está cada vez más difundida debido a la importante mejora que genera en la eficiencia de los concentradores. Estos sistemas detectan la posición del sol con alta precisión y no tienen el problema del sensor de luz, pero aun así necesitan un sensor de realimentación para detectar si el reflector está en una ubicación exacta.

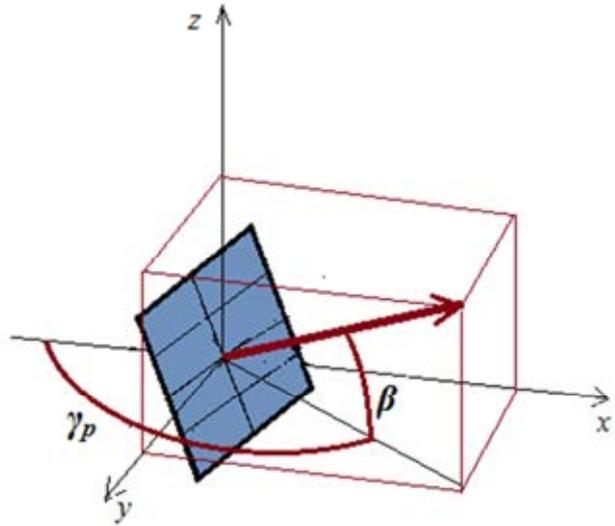


Figura 4: Definición de las coordenadas angulares del helióstato

CÁLCULOS DE LAS POSICIONES ANGULARES DEL HELIÓSTATO: AZIMUT Y ELEVACIÓN

Las relaciones básicas, que permiten determinar las coordenadas angulares del sol para cualquier punto sobre la superficie terrestre, son representadas en las ecuaciones 1 a 3 (Duffie y Beckman, 2006):

$$\delta = 23,45 \text{ sen } (360 (284 + n) / 365) \quad (1)$$

$$\Theta_z = \arccos (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta) \quad (2)$$

$$\gamma_s = \text{sign} (\omega) \text{ arc cos } (\cos \Theta_z \text{sen } \varphi - \text{sen } \delta) / \text{sen } \Theta_z \cos \varphi \quad (3)$$

δ : ángulo de declinación solar

n : número de día del año

Θ_z : ángulo cenital, es el ángulo que forman la radiación directa y la vertical del lugar.

φ : latitud del lugar

ω : ángulo horario (desplazamiento angular del sol debido a la rotación de la tierra)

γ_s : azimut solar, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la radiación directa con el meridiano del lugar.

En la figura 5 se representan las direcciones de incidencia y reflexión de la radiación solar respecto a un sistema de ejes definido de manera que la normal de la superficie del helióstato está contenida en el plano x-z. Es decir, la dirección del eje x coincide con la dirección de la proyección horizontal de la normal al plano. Este eje forma un ángulo azimutal γ_p respecto al meridiano del lugar. En el esquema de la figura 5 (a) está representada la proyección de un rayo incidente sobre el plano x-z.

Los ángulos son los siguientes:

α_{sol} : ángulo entre el azimut del sol y el azimut del helióstato ($\gamma_s - \gamma_p$).

h_{sol} : altura solar, ángulo que forma la dirección del sol respecto al plano horizontal ($90 - \Theta_z$).

h'_{sol} : proyección de la dirección de un rayo incidente sobre el plano x-z.

Se puede observar en dicho esquema que para una dada posición del sol (x,y,z), se cumple que:

$$z = x \operatorname{tg} (h'_{sol}) = d \operatorname{tg} (h_{sol}) \quad (4)$$

$$x = d \cos (\alpha_{sol}) \quad (5)$$

$$h'_{sol} = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} (h_{sol}) / \cos (\alpha_{sol})) \quad (6)$$

En el esquema de la figura 5 (b) está representada la proyección de un rayo reflejado hacia el absorbedor sobre el plano x-z, cuya dirección respecto al helióstato es γ_{abs}
 α_{abs} : ángulo entre el azimut del absorbedor y el azimut del helióstato ($\gamma_{abs} - \gamma_p$).
 h_{abs} : ángulo que forma la dirección del absorbedor respecto al helióstato y el plano horizontal.
 h'_{abs} : proyección de la dirección de un rayo reflejado sobre el plano x-z.

Análogamente al caso de la incidencia, en la reflexión se puede plantear que:

$$z = x \operatorname{tg} (h'_{abs}) = d \operatorname{tg} (h_{abs}) \quad (7)$$

$$x = d \cos (\alpha_{abs}) \quad (8)$$

$$h'_{abs} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\operatorname{tg} (h_{abs}) / \cos (\alpha_{abs})) \quad (9)$$

Planteando que la dirección de la normal al plano es bisectriz entre los rayos incidentes y reflejados se puede obtener el ángulo de inclinación del helióstato β :

$$\beta = (h'_{sol} + h'_{abs}) / 2 \quad (10)$$

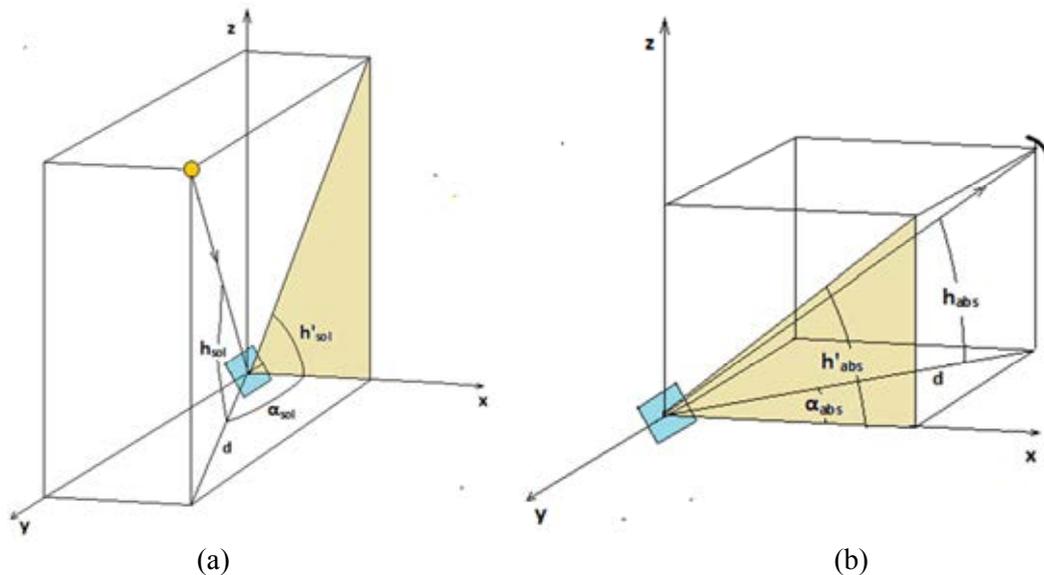


Figura 5: Proyecciones sobre el plano normal al helióstato: a) de un rayo incidente, b) de un rayo reflejado

En cuanto al cálculo del azimut del plano, éste debe ser bisectriz entre el azimut del sol y la dirección de la proyección horizontal de la línea que une el heliostato con el absorbedor (figura 6):

$$\gamma_p = (\gamma_s + \gamma_{abs}) / 2 \quad (11)$$

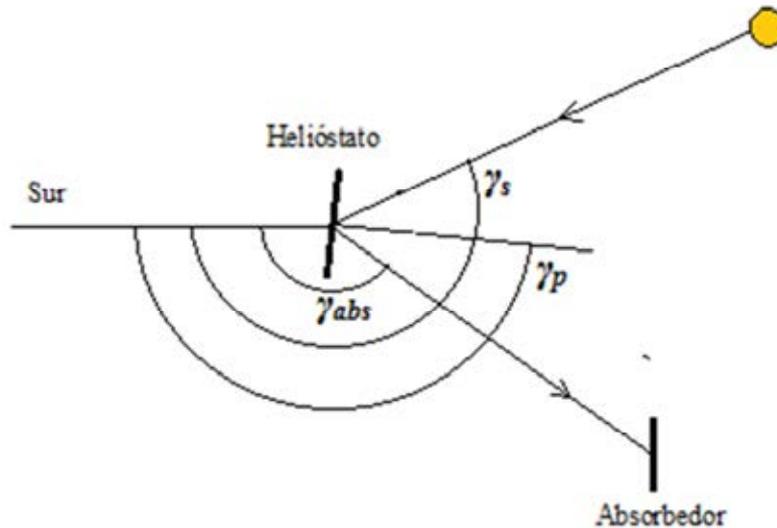


Figura 6: Proyección en planta - ángulos azimutales

La determinación de los valores que deben tomar en cada instante los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada heliostato para reflejar la radiación solar a un punto fijo (absorbedor) en su movimiento de seguimiento al sol durante el día, para cualquier época del año se puede realizar con la siguiente secuencia de cálculo:

- Cálculo del ángulo de declinación solar para un determinado día del año con la ecuación (1)
- Cálculo del ángulo cenital Θ_z una vez definidos n , la latitud del lugar y el momento del día con la ecuación (2).
- Cálculo del azimut solar γ_s con la ecuación (3).
- Determinación de las coordenadas angulares del absorbedor respecto del heliostato en estudio γ_{abs} y h_{abs}
- Cálculo de la inclinación β con las ecuaciones de (6), (9) y (10)
- Cálculo del azimut del plano γ_p con la ecuación (11)

SEGUIDOR SOLAR CON ARDUINO

Con la llegada de los microcontroladores Arduino y el hardware asociado para controlar motores, incluyendo motores paso a paso, ha habido un considerable interés en el uso de este dispositivo de código abierto y de bajo costo para el desarrollo de seguidores solares. El problema potencial para el entorno informático Arduino es su capacidad para el uso de ecuaciones trigonométricas de varios términos.

Algunos seguidores utilizan un sensor angular analógico como sensor de realimentación que se conecta al colector solar en ambos ejes. Este sensor tiene partes móviles y lo que genera una baja durabilidad. Otros seguidores usan el codificador integrado del motor de CC dentro de los actuadores lineales. Este sistema cuenta los pulsos de retroalimentación del codificador para calcular la ubicación actual del reflector, pero también se genera un problema con esta técnica cuando se necesita restablecer el actuador lineal cada vez que se reinicia el seguidor ya que no hay una forma directa de conocer la ubicación actual del reflector.

Por lo mencionado anteriormente, en el presente desarrollo, se optó por el uso de un sensor óptico tipo horquilla FZ0888, el cual permite la realización de *homing* (mover los motores al punto de origen). De esta manera, se evita la pérdida de pasos por acumulación, ya que el sistema se reinicia al final de cada día. Además, otro beneficio de usar un sensor óptico es que no tiene limitación mecánica (como sí lo tienen los finales de carrera), lo que posibilita mover el helióstato vueltas completas en cada eje.

Para hacer *homing* se mueven ambos motores hasta que el helióstato interrumpa la ranura del sensor, entonces el sensor envía una señal al microcontrolador mediante una interrupción para detener los motores, lo que significa que llegaron a su punto de referencia.

El esquema del sistema desarrollado se muestra en la figura 7. Consta de un microcontrolador que realiza el control del sistema, una placa CNC Shield encargada de dar soporte físico a los dos controles de motores paso a paso tipo A4988, un reloj de tiempo real DS3231 y dos sensores tipo FZ0888 encargados de señalar la posición inicial del sistema (*homing*).

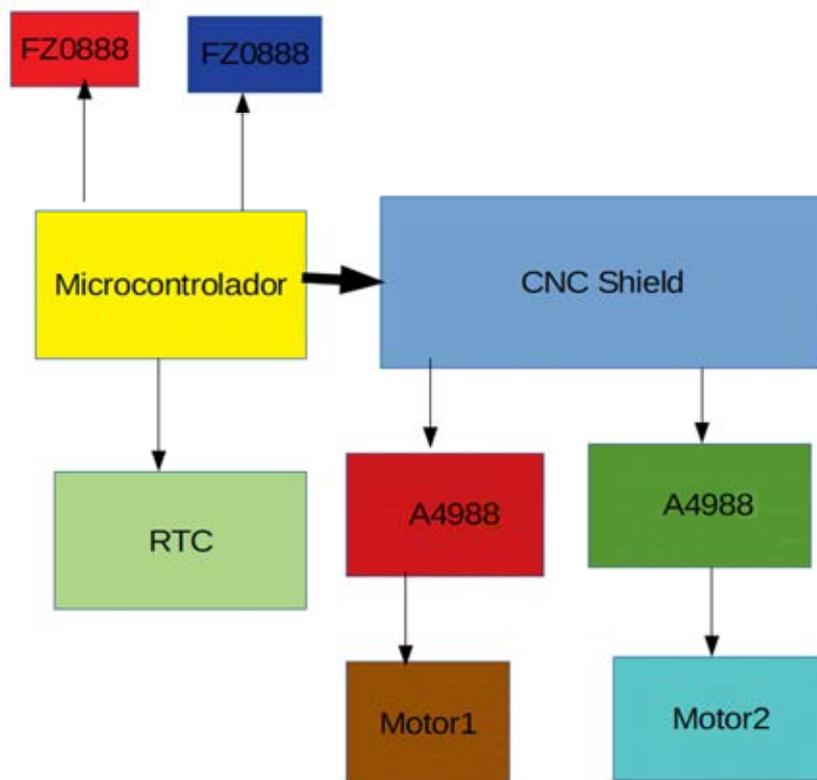


Figura 7: Esquema general del sistema

Microcontrolador:

El sistema de seguimiento usa la placa Arduino Mega 2560 como controlador principal. Esta tarjeta dispone de 54 entradas/salidas digitales, 14 de las cuales se pueden utilizar como salidas PWM (modulación de anchura de pulso). Además dispone de 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas series), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP y un pulsador para el *reset*.

Tarjeta de control numérico computacional

Se utilizó CNC Shield V3 (figura 8). Ésta tiene un total de 4 ranuras para *driver* A4988 para la conducción de 4 canales de motores paso a paso. Para el seguidor solar se utilizan sólo dos. Aporta el soporte físico para los controles de motor paso a paso.

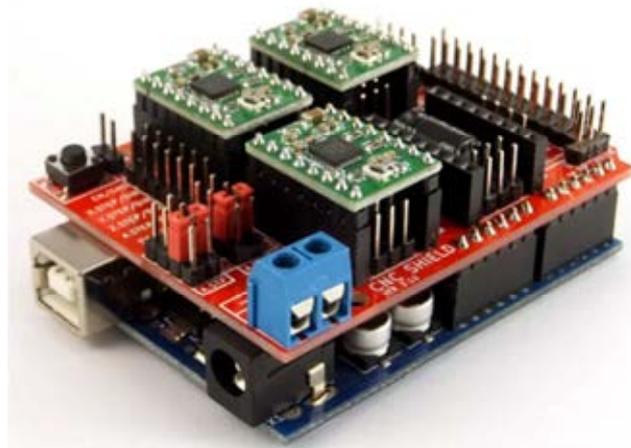


Figura 8: Placa Arduino, CNC Shield y drivers para control de motores paso a paso

Control de motor paso a paso A4988

Esta placa (figura 9) permite controlar un motor paso a paso de hasta 2 A, posee cinco resoluciones diferentes: paso completo, medio paso, cuarto de paso, octavo de paso y dieciseisavo de paso. El control se realiza de forma que cada pulso de entrada escalón corresponde a un micropaso del motor paso a paso en la dirección seleccionada por el pin DIR.



Figura 9: Pololu driver4988

Reloj de tiempo real

Controlar el tiempo en un sistema que debe moverse con precisión es de vital importancia. Para ello se usó el Reloj de Tiempo Real (RTC) DS3231, el cual se compone de un microcontrolador que cuenta el tiempo de manera precisa y, además, incorpora un sensor para compensar los cambios de temperatura que alteran los electrones del cristal de silicio. Se evita así una medición del tiempo errónea y como resultado se dispone de un reloj con una precisión de 2ppm o 1 segundo de desfajase cada 6 días. El circuito tiene una batería de litio que garantiza una alimentación continua a prueba de cortes de luz.

El RTC tiene la capacidad de ser programado para configurar la hora, el día y el año, además también se le puede programar para que envíe alarmas cada cierto tiempo (en este trabajo, cada 1 minuto). El módulo se comunica con el microcontrolador mediante bus I2C, siendo el RTC esclavo (quien envía) y el microcontrolador, maestro.

Módulo lector encoder FZ0888

La placa consta de un par fotodiodo fototransistor que detecta si algún objeto interrumpe el haz de luz entre el fotodiodo y el fototransistor lo cual permite ubicar la posición de inicio del sistema (figura 10).



Figura 10: Módulo lector encoder FZ0888

PROTOTIPO DE SEGUIDOR SOLAR EN DOS EJES

Se construyó un prototipo de seguidor en escala pequeña con el objeto de probar el funcionamiento del sistema (figura 11). Éste está compuesto por las placas y los drivers descritos anteriormente. Se utilizaron motores 28BYJ-48, los cuales tienen un paso de 5,625 grados (64 pasos por vuelta). El reductor interno tiene una relación de 1/64 y, combinados, la precisión total es de 4096 pasos por vuelta, equivalente a un paso de 0,088°. La estructura de soporte de los motores, ejes, rodamientos y espejo se construyó con una impresora 3D.



Figura 11: Fotografía del prototipo de seguidor de dos ejes.

PROGRAMA DE CONTROL DEL MICROCONTROLADOR Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El correcto funcionamiento del seguidor solar requiere los datos de día y hora de inicio, coordenadas geográficas y, además, un posicionamiento preciso del sistema: horizontal y alineado con el norte geográfico. Luego, el microcontrolador realiza las siguientes tareas.

- 1a) Configura los periféricos para el correcto funcionamiento del sistema, incluyendo *timers*, UART, interrupciones, I2C y seteando la hora y el día del reloj RTC
- 2a) Recibe la alarma que envía el RTC cada 1 minuto.

3a) Hace los cálculos de azimut e inclinación y mueve los motores la cantidad de grados correspondientes, extrapolándolo al período de 1 minuto, para evitar inercias indeseadas que pueden provocar pérdida de pasos.

4a) Repite cíclicamente las tareas a partir del paso 2a) hasta el fin de la jornada solar y rebote el plano a la posición horizontal.

En una estación de control, se ubica un anemómetro, el cual mide la velocidad del viento. Para ráfagas de alta velocidad la estación enviará una señal mediante *wifi* al microcontrolador, el cual interrumpirá la tarea que estaba haciendo para poner el espejo horizontal, de cara hacia el suelo. Cuando disminuye el riesgo por altas ráfagas, el helióstato vuelve a su posición de colección. Se programó el microcontrolador para las siguientes tareas:

1b) Interrumpe el proceso que estaba haciendo y guarda la posición en la que recibió la alarma (mediante *encoders*).

2b) Mueve el motor que controla la inclinación del helióstato hasta la posición horizontal y permanece allí hasta recibir una nueva señal desde la estación.

3b) Con la señal de fin de ráfagas peligrosas desde la estación, el microcontrolador reanuda la tarea a partir de la posición guardada sumando los pasos correspondientes por el tiempo transcurrido en la alarma y vuelve a la tarea 2a).

Se realizaron pruebas del seguidor comprobándose un funcionamiento correcto en el seguimiento solar, acordes a la escala del prototipo. También se comprobó el rebatimiento de protección simulando la señal de alarma por viento.

CONCLUSIONES

Se construyó y ensayó un primer prototipo de seguidor solar de dos ejes en el marco del desarrollo de helióstatos de un horno solar destinado a dar respuesta a una demanda concreta de una empresa productora de boratos. Se obtuvieron los primeros resultados, los cuales se destacan a continuación.

Se encontraron las ecuaciones que permiten determinar los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada helióstato para cada instante. Estas ecuaciones fueron incorporadas en la programación, comprobándose la capacidad del microcontrolador de Arduino para utilizarlas en los cálculos.

Se obtuvo un seguimiento de gran resolución y precisión mediante el uso del micro *stepping* de los drivers A4988 y del reloj de tiempo real (RTC) DS3231. De esta manera los errores del sistema electrónico pasan a ser menores que los originados en el juego de los engranajes de los reductores mecánicos.

Se resolvió adecuadamente el control del reinicio diario que evita la pérdida de pasos por acumulación durante largos períodos. Esto se logró mediante el control de la posición horizontal de referencia con el uso de un sensor óptico tipo horquilla FZ0888.

Se encontró el algoritmo que permite interrumpir el seguimiento por riesgo de daño por vientos fuertes, rebatir el plano del helióstato y recuperar luego el seguimiento con la señal de fin de riesgo.

Se realizaron las primeras experiencias de seguimiento solar comprobando el funcionamiento esperado del equipo. Estos resultados indican que se está en condiciones de construir el sistema de seguimiento y alarma del prototipo industrial con motores y reductores en escala real, utilizando el mismo sistema electrónico.

REFERENCIAS

- Al Naima F. M., Ali R. S. and Abid A. J. "Solar Tracking System: Design based on GPS and Astronomical Equations," IT-DREPS Conf. Exhib., pp. 1–6, 2013.
- Al Naima F. M., Ali R. S. and Abid A. J. "Design and Implementation of a Smart Dual Axis Sun Tracker Based on Astronomical Equations," vol. 1, pp. 1–6, 2012.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). "Solar Engineering of Thermal Processes", 3ª edición. Wiley Interscience, New York.
- Ponniran A., Hashim A. and Munir H. Ali. "A design of single axis sun tracking system," in 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2011 - Program and Abstracts, 2011, pp. 107–110.
- Rizal Y., Wibowo S. H., and Feriyadi, "Application of solar position algorithm for sun-tracking system," in Energy Procedia, 2013, vol. 32, pp. 160–165.
- Wang J. M. and Lu C. L.. "Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system," Sensors (Switzerland), vol. 13, no. 3, pp. 3157–3168, 2013.

ABSTRACT: The development of a two-axis solar tracking system for movement control of the heliostats of a solar furnace for minerals treatment at high temperatures is presented. By using solar geometry equations the instantaneous angular positions of azimuth and inclination of the reflectors were found. With such equations, a calculation routine was developed allowing to control the movement of stepper motors. An electronic system was designed and built for the numerical control of the steps of the motor for tracking purposes and for refolding the tracker's plane before the alarm of intense wind gusts. The system was tested using a small-scale prototype.

Keywords: solar energy, two-axis tracker, heliostats

GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA ASOCIADA A VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Pierantonelli Mario¹, Medina Juan Cruz², Quintilla Tomás²

Licenciatura en Ambiente y Energías Renovables (LAER)- Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas- Universidad Nacional de Villa María (UNVM)- Arturo Jauretche 1555- V. María- Cba- CP 5900
 Tel. 0353-4539106- e-mail: mpierantonelli@unvm.edu.ar

Recibido 14/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: Se pretende investigar un esquema de movilidad urbana basado en móviles eléctricos alimentados por energía solar en cuanto a consumos, emisiones, efectos en las matrices energética y de transporte, sustentabilidad, así como la percepción de la sociedad.

Se adoptan dos líneas de investigación paralelas; una documental con seguimiento y análisis técnico de los modelos que presentan las automotrices y otra experimental que implica efectuar mediciones en móviles eléctricos y en una instalación fotovoltaica con inversor conectada a la red eléctrica, que permite diferir la carga del vehículo del ciclo diario solar y cuantificar el balance neto de energía.

La producción distribuida de energía fotovoltaica permitiría minimizar el impacto de la carga de los autos, ya que la red puede verse fortalecida si hay excedentes de energía o si se usan las baterías del auto como respaldo, incrementando la sinergia entre las partes.

Palabras clave: auto eléctrico, generación distribuida, sinergia, sustentabilidad

INTRODUCCION

Dentro de un esquema de desarrollo sostenible es imprescindible incluir al transporte de personas y cargas como sujeto de estudio dado el porcentaje de actividad y consumo de energía que implica en la matriz socioeconómica de la sociedad.

En el caso de estudio se centra la investigación en el traslado de personas en el ámbito urbano y suburbano.

El gráfico siguiente (Fig. 1) ilustra sobre la energía que se gasta por persona y por kilómetro en diferentes medios de transporte.

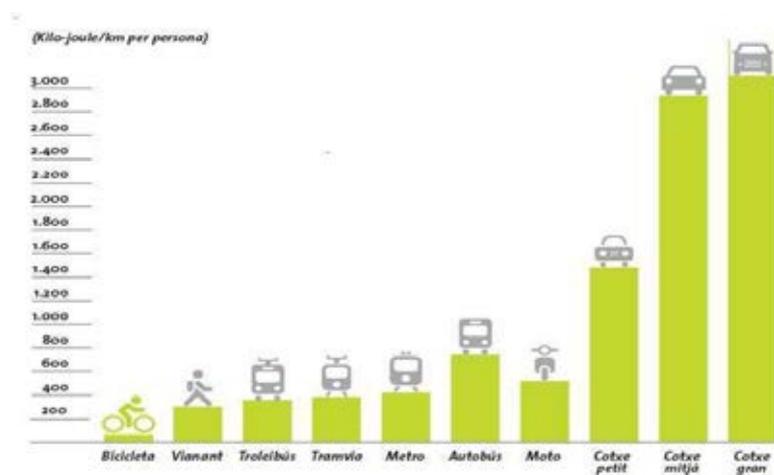


Figura 1: Energía en transporte. Fuente: Federación Catalana de Ciclistas

¹Ingeniero, Profesor LAER- UNVM

²Estudiantes LAER- UNVM

Otras variables tales como independencia, rapidez, practicidad, autonomía y las de tipo psicológico no son fácilmente mensurables, pero inciden fundamentalmente en la voluntad del individuo de adquirir o no un determinado tipo de vehículo para uso personal o familiar y han sido el motor de la industria del automóvil en los últimos cien años. El dilema es que esa gran industria que es fuente de trabajo para millones de personas está sustentada sobre un consumo de combustible cada vez mayor, incompatible con las reservas del planeta además de causar un deterioro ambiental por las emisiones derivadas de esos automóviles y la congestión en el tránsito en ciudades y autopistas. Cualquier acción que se tome en relación al transporte individual debe contemplar las consecuencias ambientales, energéticas y sobre el empleo y debe tener el consenso de gobiernos, empresas, particulares y organizaciones civiles. Es en este contexto donde la alternativa de propulsión eléctrica puede ser conveniente y sustentable ateniéndose a algunos preceptos básicos y que son objeto del estudio, que esté acompañada por una fuente de energía renovable y que tenga un efecto positivo o neutro en la matriz energética.

CONSIDERACIONES

El análisis del desarrollo del parque automotriz en retrospectiva muestra que en los años posteriores a la 2da. Guerra Mundial se produce un gran aumento de la cantidad de vehículos con tendencias definidas según los mercados.

Las automotrices europeas orientaron mayormente su producción hacia modelos pequeños y de baja cilindrada con consumos contenidos para lo que permitía la tecnología de la época. Estados Unidos hacía lo contrario, en la posguerra fabricaban autos de gran tamaño y consumo, que fueron aumentando ambos hasta la crisis del petróleo en los 70 en la que redujeron dimensiones y cilindradas y empieza el control de emisiones principalmente en California. Pasada la crisis, baja el precio del petróleo y tanto Estados Unidos como las fábricas de Europa y Asia que vendían en el mercado americano comienzan de nuevo la escalada de tamaño y consumos, este último se ve morigerado por los avances en las plantas motrices, no obstante, comienza una carrera por las prestaciones, velocidad, aceleración y confort que hace que los consumos no disminuyan.

En los 90 hubo algunos intentos de fabricar autos eléctricos que fueron discontinuados, el petróleo seguía siendo barato. Recién después del 2000, con crisis petroleras de fondo por las proyecciones de escasez del recurso las fábricas empiezan a pensar en modelos orientados al bajo consumo, tanto en plantas motrices de combustión interna como híbridasyeléctricas (Etchegaray et al, 2013).

Se pueden clasificar a los autos eléctricos en tres tipos básicos: híbridos, híbridos con recarga (plug in) y eléctricos puros.

Los automóviles eléctricos puros sólo cuentan con motores eléctricos y acumulan su energía exclusivamente en la batería, que puede ser recargada desde la red, se pueden dividir en tres categorías:

- Los de alta gama con una gran capacidad de batería (más de 60Kwh) y altas prestaciones,

Como ejemplo: Tesla roadster y Tesla S, Rimac, Fisker Karma, etc.

- Los medianos tales como el Mitsubishi i-Miev, Nissan Leaf, Renault Zoe; autos para cuatro personas con una autonomía entre 100 y 150 Km.

- Los chicos, para dos personas, generalmente en tandem, de muy bajo peso y muy aerodinámicos con una autonomía de hasta 100 Km. Esta última categoría es la más promisoría ya que son vehículos muy prácticos y ágiles, ocupan poco espacio en las calles (miden menos de tres metros de largo y alrededor de un metro de ancho), son muy livianos, aproximadamente 400 kg aún con las características de confort y seguridad modernas.

Un documento que avala la conveniencia de esta última categoría es un informe de la Oficina Federal de Estadística de Alemania según el cual un 60% de los trabajadores que viajan entre el hogar y el puesto de trabajo utilizan el coche y de estos un 90% viajan solos, y que el 73,9% recorren menos de 25 km para llegar al puesto de trabajo con lo que este tipo de autos cumpliría ampliamente con sus necesidades (Adler et al. 2006). Esto se puede extrapolar a cualquier gran ciudad, basta apostarse al costado de una autopista urbana en Buenos Aires y observar el porcentaje de autos en los que viaja únicamente el conductor.

En este contexto aparecen como solución los microcoches e incluso triciclos carrozados con control de inclinación, algunos con motor de combustión interna y otros eléctricos o híbridos que consumen y contaminan hasta 10 veces menos que un automóvil convencional, con la ventaja adicional de ocupar menos superficie en planta permitiendo mejorar el tránsito y el estacionamiento.

Se menciona como una clase aparte a los vehículos eléctricos con celdas de combustible que, aunque tienen emisión local cero conllevan los problemas de costo, generación, almacenamiento y distribución inherentes al hidrógeno.

A fines del año 2017 el parque automotor mundial es de aproximadamente 1300 millones de vehículos (OICA, 2018) (incluidos autos camiones y ómnibus), los autos circulando suman unos 850 millones y se fabrican anualmente 85 millones (IEA, 2017), de los cuales aproximadamente 1,1 millones son eléctricos (entre eléctricos puros e híbridos) (IEAGEVO, 2018).

El consumo anual de petróleo del 2017 llegó a los 98 millones de barriles por día, de este total el transporte se lleva aproximadamente 49 millones ($\approx 50\%$) y el transporte individual con vehículos livianos unos 23 millones de barriles ($\approx 25\%$) (BP, 2018). Los escenarios futuros que proyectan diferentes organizaciones de prestigio internacional en este ítem de transporte han cambiado en los últimos dos años debido a la aceleración de ventas de vehículos eléctricos, pero solo las alternativas más optimistas permiten cumplir con las metas de emisiones, por ejemplo, al 2040 (IEA, WEO 2017).

Si se enfoca el estudio en la fracción de transporte individual y especialmente en el urbano y el suburbano, se observa que este es un mercado absolutamente dominado por un grupo de corporaciones imbricadas en una maraña de asociaciones entre las mismas automotrices y las petroleras que por ahora suministran energía para producir y hacer funcionar los autos. Ateniéndose al porcentaje que se lleva el transporte del consumo mundial de petróleo (la mitad) se observa que continua la era del petróleo y más aún la del automóvil.

Un mínimo análisis de la sustentabilidad de este esquema conduce a pensar en un colapso en un plazo mediano de no haber un cambio sustancial en los consumos y en el enfoque del mercado hacia autos más durables y eficientes.

Es necesaria la introducción acelerada de vehículos biplaza, de bajo peso, aerodinámicos, ágiles y atractivos y que según estadísticas sobre porcentaje de ocupación de vehículos permitirían cubrir un porcentaje significativo del mercado y mantener el empleo en las fábricas.

La alternativa eléctrica presenta ventajas en cuanto a menor consumo, menor contaminación, menos ruido y si bien la autonomía es menor, en recorridos urbanos con frecuentes paradas y aceleraciones permite recargar parcialmente las baterías mediante frenado regenerativo con la energía de inercia del auto, que de otra forma se disiparía como calor en los frenos.

Otra ventaja significativa es que pueden ser recargados desde la red en las casas, lugares de trabajo, etc. En este caso tenemos que considerar la eficiencia del cargador, las pérdidas en la red y hay que considerar la eficiencia de origen de la energía eléctrica que en el caso de la energía solar, eólica o hidráulica podemos considerar del 100 % y emisión cero. Pero ocurre que la red eléctrica nacional tiene casi un 60 % de generación térmica con rendimientos diversos, hay centrales de ciclo combinado cercanas al 60% y centrales de pico con turbinas de gas tan bajas como un 20%, la eficiencia promedio es de alrededor del 40% (BEN 2016).

Si en cambio se asocia un techo solar fotovoltaico en los domicilios puede resultar en un círculo virtuoso que permita una economía energética cuasi-autónoma. La tecnología existe y está disponible y los precios de los paneles fotovoltaicos están en un nivel bajo de aproximadamente 0,3 U\$/Wp FOB en China para panel certificado (Photon Magazine, promedio 2017), aún queda una ventaja adicional y es que la batería del auto puede ser usada como amortiguador de picos de consumo en la red en un esquema V2G (Vehicle to grid) (Kempton et al. 2005).

METODOLOGIA Y PROCEDIMIENTOS

Se analizan las características de automóviles eléctricos puros según las especificaciones de sus fabricantes y test de publicaciones especializadas y se comparan con las obtenidas en recorridos en el campus universitario con los dos móviles disponibles, un prototipo desarrollado en trabajos de investigación anteriores y uno construido por un particular.

Dentro de la categoría auto grande se considera al Tesla S:

Tesla S

Sedán 5 puertas- Peso: 2108 Kg-Motor: 260 KW- Baterías: Litio – 60 KWh

Veloc. Max: 210 Km/h- Autonomía: 333 Km- Consumo medio: 180 Wh/Km

Dentro de la categoría medianos se considera dos automóviles de serie que están en el mercado internacional, Nissan Leaf y Mitsubishi i-Miev.

Nissan Leaf:

Sedán 4 puertas- Peso: 1600 kg - Motor: 80kW- Baterías: litio – 24 KWh – 270 kg
Veloc. Max: 140 km/h- Autonomía: 160 km

Mitsubishi i-Miev

Monovolumen 4 puertas-Peso: 1080 kg- Motor: 49 kW -Baterías: litio –16 KWh
Veloc. Max: 130 km/h- Autonomía: 120 km

Dentro de la categoría micro coches se considerancinco autos presentados que creemos representativos de esta nueva oferta de la industria y que cumplen con los requisitos enumerados anteriormente sobre sustentabilidad:

Opel Rak-e

Monovolumen biplaza en tándem- Peso: 380 kg- Motor: 10.5 kW- Baterías: litio -5kwh
Veloc. Max: 120 km/h -Autonomía: 100 km - Consumo: equivalente a 0,6 lit/100 km

Renault Twizy

Monovolumen biplazaen tándem –Peso: 450 kg - Motor: 15 kW –Baterías: litio –7 KWh
Veloc. Max: 80 km/h - Autonomía: 100 km

Audi Urban Concept

Monovolumen biplaza desplazado- Peso: 480 Kg - Motor: 15 KW -Baterías: litio- 7 KWh –
Veloc. Max: 100 Km/h- Autonomía: 73 Km- ciclo NEOC

Volkswagen Nils

Monovolumen monoplaza – Peso: 460 Kg - Motor: 15 KW-Baterías: litio – 5,3 KWh
Veloc. Max: 130 Km/h- Aceleración: 11 seg. de 0 a 100 Km/h - Autonomía: 65 Km

Toyota I-Road

Monovolumen biplaza – tres ruedas – Peso: 300 Kg- motor 4KW- Baterías: LitioAutonomía: 50 Km

Vehículo construido en la UNVM:

Fiat Uno eléctrico

Sedán bicuerpo, largo 3,64 m, alto 1,44 m, ancho1,54 m- Peso: 920 kg-

Motor: asincrónico 5,5 kW a 1500 rpm, torque 36,5 Nm

Baterías: Pb- Ac electrolito absorbido, 9,8 kwh – 264 kg

Veloc. Max: aprox. 60 km/h

Autonomía: aprox. 70 km, ciclo urbano.



Figura2:Móvil UNVM Figura3: Grupo motor-transmisión Fiat Uno

Se elaboran tablas de datos en base a las mediciones efectuadas en un recorrido establecido en el campus y sus inmediaciones que permiten obtener gráficos de energía y de potencia representativos del consumo del móvil:

Recorrido: 3053 m Tiempo requerido: 376 seg. Veloc. Media: 29,5 Km/h

Tensión de batería: 290 V Frecuencia de medición: 1 Hz

Peso en orden de marcha: 1090 Kg

La prueba se efectuó en un trazado que consta de 12 cambios de dirección de 90 ° y con dos personas a bordo. Las velocidades de esquina y curva se trataron de mantener menores a 20 Km/h para simular un recorrido urbano, en recta se mantuvo inferior a 60 Km/h.

En base a los datos recogidos en formato del equipo de medición y pasados a planilla de cálculo se confeccionan gráficos de la energía consumida, regenerada y neta (Fig.4) y de la potencia instantánea (Fig. 5).

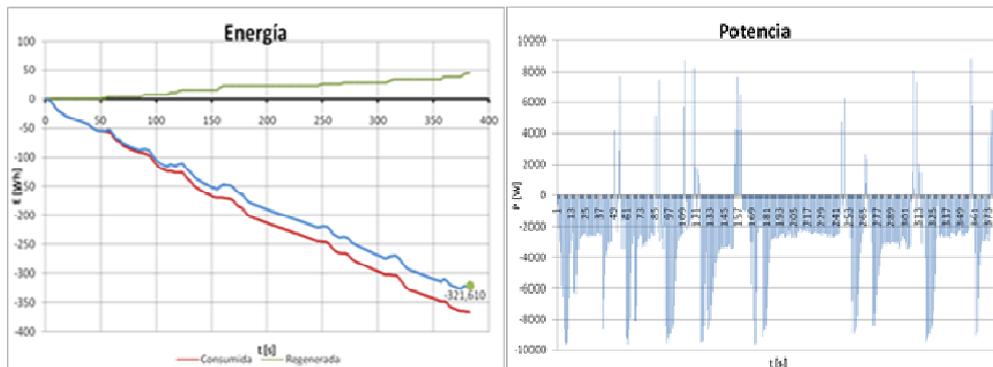


Figura 4: Gráfico de energía Fiat Uno Figura 5: Gráfico de potencia Fiat Uno

Con los datos de energía al final del recorrido se hace un balance:

Energía consumida: 366,338 Wh Energía regenerada: 44, 728 Wh
 Balance energía: 321,610 Wh Consumo: 105 Wh/Km

Se observa que con el frenado regenerativo se produce un ahorro del 12,2 % de energía, en un trayecto en tránsito real donde hay más frenadas por esquinas o para evitar colisiones este porcentaje puede ser mayor. Estas pruebas se repitieron en diversas condiciones ambientales en el mismo circuito prácticamente sin cambios apreciables en los valores de consumo específico, por lo que los datos obtenidos se pueden considerar representativos de un consumo medio en condiciones normales de tránsito urbano. Dentro del mismo proyecto se hicieron mediciones de consumo de energía en un auto eléctrico construido por un particular utilizando el mismo instrumental y protocolo usado para nuestro vehículo. Estas mediciones y su análisis posterior agregan valor al trabajo de investigación ya que se trata de una topología totalmente diferente a la del Fiat Uno eléctrico de la UNVM.

Daihatsu eléctrico

Se trata de una camioneta Daihatsu (Fig. 6) a la que se le ha extraído el motor y el tren trasero reemplazando a este último por dos motores en rueda de 1,5 KW c/uno. En este caso es un vehículo más liviano y se obtienen consumos promedio en circuito urbano de 88 Wh/Km contra 105 Wh/Km del Fiat Uno. Cabe aclarar que el Fiat de la UNVM tiene frenado regenerativo y el Daihatsu no, pero hay una considerable diferencia en los pesos.

Daihatsu Van recortada- peso 550 Kg- dos motores en rueda de imán permanente de 1.5 KW c/uno, total 3 KW con dos controladores de switching con realimentación por efecto Hall- 5 baterías VRLA de 12 V -60 Ah que suman 60 V- peso de las baterías 120 Kg.



Figura 6: Daihatsu Figura 7: Instrumental

El instrumental utilizado en los dos casos es (Fig. 7):

- Pinza amperométrica TES 3060 TRMS con Datalogger conectado a Notebook Samsung con software Power Meter de TES, con conversor Manhattan.
- Shunt 100 A- 50 mV conectado a osciloscopio Hantek con Datalogger incluido y también a amperímetro analógico Igniter.

De esta forma se obtienen dos mediciones redundantes de corriente, una a través la pinza amperométrica optoacoplada con salida RS232 convertida a USB y entrada la PC y la otra desde el

shunt con filtro pasabajos RC al osciloscopio con datalogger, corroborados en forma visual con el amperímetro analógico. Esto permite garantizar la consistencia de los datos, que luego son transportados a una planilla de cálculo y se obtienen los promedios y gráficos que nos dan los consumos citados ut-supra.

Si se comparan los gráficos siguientes del Daihatsu con los anteriores del Fiat, se observa la ausencia de frenado regenerativo tanto en el de potencia(Fig. 8) como en el de energía (Fig. 9):

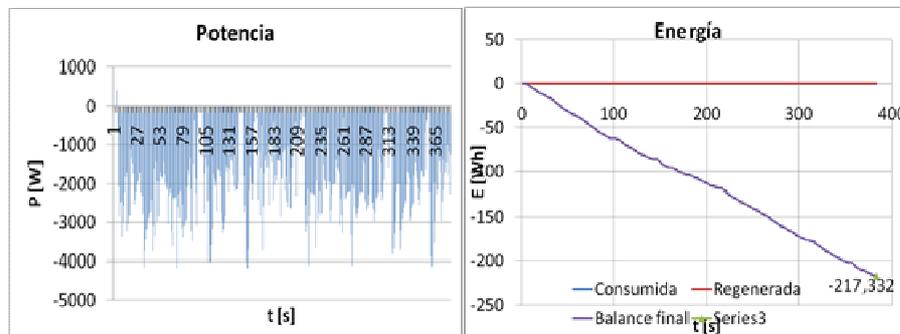


Figura 8: Gráfico de potencia Daihatsu *Figura 9: Gráfico de energía Daihatsu*

En la figura 10 se puede apreciar la eficiencia de los móviles eléctricos comparados con los otros medios de locomoción.



Figura 10. Elaboración propia basada en datos de la Federación Catalana de Ciclistas.

Equipamiento de generación distribuida fotovoltaica

En junio del año 2017 se completó la instalación de los equipos (Fig. 11), la misma consta de 21 paneles fotovoltaicos SOLARTEC KS 46T con una potencia nominal de 46 Wp en condiciones STC (25°C temperatura de celda, irradiación 1000W/m², AM 1.5) cada uno, puestos en serie de 3 filas con 7 paneles, lo que daría un total de 966 Wp nominales. Cabe destacar que en realidad la mejor medición en condiciones óptimas de irradiación (1000 W/m² perpendicular a los paneles) fue de 820 Wp lo que representa un rendimiento de $\eta = 820 \text{ W} / 966 \text{ W} = 0.848$ (85%) respecto a la potencia pico declarada por el fabricante. De manera que estos paneles entregan un 15% menos de la potencia especificada, por lo cual se puede considerar como potencia nominal de la instalación 820W.

El resto de la instalación, cuenta con protección para los equipos y para el usuario y está compuesta por descargadores de tensión de CC y CA, llaves térmicas de CC y CA, disyuntor, el inversor SMA Sunny Boy de 1500W y un medidor de energía de CA.



Figura 11 y 12. Instalación fotovoltaica, auto electrico y equipo de trabajo.

Debido a cuestiones arquitectonicas la orientación de la instalación no es la optima (norte), siendo esta nornoroeste. Esto hace que la curva de generación se encuentre aplanada en las horas de la mañana.



Figura 13. Grafico de generación fotovoltaica. 24 de diciembre 2017. Inversor SMA Sunny Boy.



Figura 14.. Grafico de radiacion solar horizontal y temperatura del aire. Dia 24 de diciembre del 2017.

Fuente: Estacion Metereologica UNVM.

La energía entregada por el equipo a la red eléctrica de la universidad desde el 13 de junio del año 2017 durante un año fue de: 1175,87 kWh. Cabe destacar que el equipo no generó durante 36 días concentrados en el receso de verano, que normalmente son de gran insolación. La desconexión del equipo se debió a que el personal de infraestructura desconecta las llaves para tareas de mantenimiento, en esas condiciones el equipo no genera energía ya que se desconecta automáticamente por razones de seguridad (operación anti-isla).

Instalación y puesta en marcha del equipo fotovoltaico :13 de junio 2017

Orientación de la instalación Fotovoltaica: Nornoroeste

Inclinación de los paneles solares con respecto a la horizontal: 40°

Potencia Nominal: 966 Wp

Potencia Real: 820Wp

Generación anual: 13/06/2017 a 13/06/2018 Energía 1175.87 Kwh descontando 36 días con el equipo apagado (concentrados en los días de verano).

Promedio anual : 1175.87 kWh/ (365 días-36 días) = 3,574 Kwh / día

Horas equivalentes Pico Solar =3574 Wh/820W = 4,36 h

Mes-Año	Kwh Generado Mensual	Dias sin generacion(cortes)	Dias con generacion
jun-17	42,73	1	16
jul-17	76,66	0	31
ago-17	108,85	0	31
sep-17	104,30	0	30
oct-17	144,05	0	31
nov-17	110,74	5	25
dic-17	104,58	5	26
ene-18	96,45	10	21
feb-18	71,68	12	16
mar-18	128,99	2	29
abr-18	76,17	0	30
may-18	68,48	1	30
jun-18	42,19	0	13
Total	1175,87	36	329

Figura 15. Tabla de generación total. Elaboración Propia

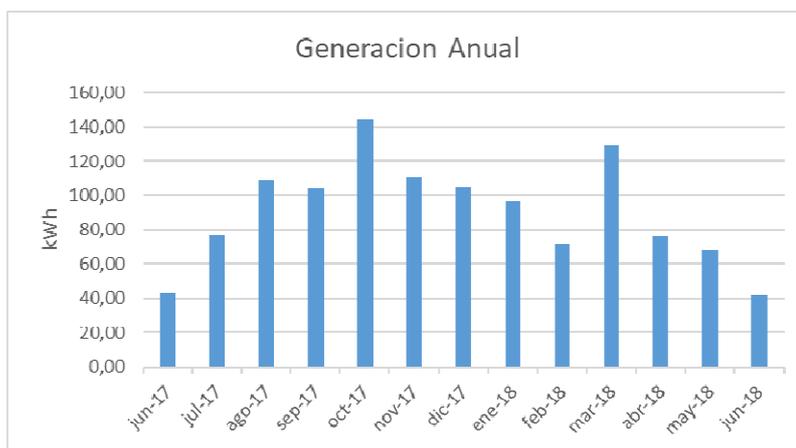


Figura 16: Grafico de generación Anual. Elaboración Propia

Durante el periodo de generación (329 días), se obtiene un promedio diario de 3,574 kWh, que con 820 W de potencia real representa un promedio de insolación a 1 kW / m² de 4,36 h (3574 Wh/ 820W) que esta dentro de los valores promedios de la latitud correspondiente de Villa María según las cartas de la Red Solarimétrica de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales que coinciden con los valores del Atlas de Energía Solar de la República Argentina del grupo GER Solar de la Universidad Nacional de Lujan (UNLU) (Grossi Gallegos, Righini) y que son muy aproximados a los datos que se obtienen con el programa RET Screen con datos de la NASA.

Si se relacionan estos valores con los consumos medidos de nuestros móviles eléctricos: 105Wh/km para el Fiat Uno y 88Wh/km para el Daihatsu se puede inferir que con una instalación de 1kWp en una vivienda se tendria energía suficiente para recorrer:

$$(4,360 \text{ Wh/día}) / (105 \text{ Wh/km}) = 41,52 \text{ km/día para el Fiat Uno}$$

$$(4,360 \text{ Wh/día}) / (88 \text{ Wh/km}) = 49,545 \text{ km/día para el Daihatsu}$$

Estos valores son teóricos ya que deben ser afectados por el rendimiento de carga y descarga de las baterías y de los cargadores. Si se estima conservadoramente en un 75%, los kilometrajes se reducen a:

$$(41,52 \text{ km/día}) * 0,75 = 31,14 \text{ km/día para el Fiat Uno}$$

$$(49,545 \text{ km / día}) * 0,75 = 37,16 \text{ km/ día para el Daihatsu}$$

Aun con estos coeficientes se observa que con un mínimo de superficie (entre 6m² y 7m² dependiendo del rendimiento de los paneles) se puede captar suficiente energía para cubrir los recorridos diarios de la gran mayoría de las personas que viven en ciudades medianas como Villa María. La forma más

económica y sustentable de utilizar esta energía es mediante la interacción con la red eléctrica en un esquema de energía distribuida, en el que se produce una compensación instantánea entre generadores y consumidores sin necesidad de recurrir a sistemas de almacenamiento de energía.

El efecto de las cargas de las baterías de los autos sobre las redes en cuanto a potencia se minimiza si hay simultaneidad con la generación fotovoltaica o si la carga se hace en hora de valle, y aun cuando se haga la carga en horas de pico, se mantiene el balance energético.

Desde el punto de vista económico, el balance también es favorable al vehículo eléctrico ya que si se estima un consumo de 10 km / litro en recorrido urbano para un automóvil convencional y 10km / kWh para un sedán eléctrico mediano promedio, se obtiene una relación de 10 a 1 en favor del eléctrico.

1 litro de nafta super = \$ 40 pesos argentinos

1 kWh de red promedio = \$ 4 pesos argentinos.

Si existiera simultaneidad entre la carga y la generación fotovoltaica la relación es aún más favorable al eléctrico.

En cuanto a la inversión, un presupuesto mínimo con inversor europeo de primera marca y paneles certificados con perfilera de hierro pintado, cables, protecciones y mano de obra esta en el orden de US\$ 3000 para 1 kWp.

4 paneles 250 W = US \$ 940

Inversor SMA 1,5 kW = US \$ 1400

Estructura, protecciones y cableado = US \$ 350

Mano de obra = US \$ 250

Precios obtenidos de: Enertik, TecSolar, Baratec.

Este precio es susceptible de ser mejorado con la nueva reducción de aranceles para insumos destinados a energías renovables. Por ejemplo en Chile el valor para instalaciones fotovoltaicas on-grid ha llegado a US\$ 1,5 el Wp (Rotter, 2016).

En referencia a la inversión en el vehículo los precios del mercado son muy elevados para la realidad nacional. La opción más conveniente sería la conversión de vehículos convencionales a eléctricos, mediante la importación de kits de conversión valuados en US\$ 2045 que incluyen: motor de inducción de 40 HP, controlador, acelerador y cargador de batería. Respecto al paquete de baterías de LiFePO4 con todo lo necesario para su instalación, se lleva la parte más abultada de la inversión, con un costo de US\$ 4300 por 10.8 kWh (72 V, 150 Ah). Precios obtenidos de Organización autolibre Uruguay.

DISCUSIÓN

La Ley Nacional n° 27.424 de Generación Distribuida con Energías Renovables se adapta a la perfección a este esquema, ya que permite el autoconsumo con inyección de excedentes a la red. No obstante, las distribuidoras presentan objeciones a esta implementación con argumentos tales como: disminución del VAD (valor agregado de distribución), uso espurio de las redes y posible inestabilidad de las mismas. Estos argumentos son refutables desde el punto de vista técnico ya que está garantizada la operación de los inversores homologados, en sus parámetros eléctricos (anti isla, forma de onda, estabilidad, factor de potencia) y avalados por una gran cantidad de instalaciones en todo el mundo e incluso en la República Argentina.

En esta experiencia donde se inyecta energía a la red interna de la UNVM, acredita más de 1 año de funcionamiento sin ningún problema técnico hacia la red.

Esta discusión se ha dado en el seno del Consejo Asesor de Políticas Energéticas de Córdoba (CAPEC) donde, además, las distribuidoras argumentan una pérdida de rentabilidad debido a que el autoconsumo provocaría un descenso en los niveles de facturación debido a un cambio de escalón de los consumidores. Este argumento carece de validez per se, pero además se contraponen con las políticas nacionales y provinciales de eficiencia energética que resultarían en reducciones de consumo aun sin generación distribuida.

En síntesis, un esquema virtuoso como es el de la generación distribuida con energías renovables se ve afectado por intereses corporativos que además estarían directamente en contra del derecho al autoconsumo que otorga expresamente la Ley Nacional n° 27.424.

La sinergia entre los vehículos eléctricos y la generación distribuida se expresa claramente en los cálculos anteriores y es debida al altísimo rendimiento de los motores eléctricos, los nuevos controles de velocidad, el frenado regenerativo, el avance en la tecnología de baterías de bajo peso y alta

capacidad de almacenamiento y desde el lado de la generación, la disponibilidad de paneles solares de alto rendimiento y bajo costo, y el hecho que otros usuarios de la red eléctrica consumen los excedentes y la misma red actúa como backup en los momentos de ausencia de insolación. Esta sinergia se vería incrementada notablemente si se pudiera adoptar un esquema V2G (vehicle to grid), donde el automóvil con su capacidad de almacenamiento de energía en las baterías y mientras está conectado al cargador, actúa como una reserva de disponibilidad inmediata para absorber picos de consumo de la red. Esto requiere una red inteligente e inversores inteligentes, y ya está siendo implementado en algunas ciudades del mundo, ya se venden autos (Hyundai Ioniq, solo algunos modelos) con inversores inteligentes incorporados que se configuran de acuerdo a las necesidades del usuario y de la red.

Otra consideración en cuanto a los vehículos medidos es que no representan lo mejor de la tecnología actual en cuanto a rendimientos, han sido construidos con los elementos disponibles en el país en su momento, y los avances en el tema son cotidianos. Las baterías usadas son de plomo con la desventaja del peso y el rendimiento de carga y descarga, si se usaran baterías de litio se podría reducir el peso casi a la cuarta parte con una consecuente disminución de consumo.

Aún con estos elementos que no son óptimos se puede concluir que una vez realizada la inversión se obtendría combustible gratis para desplazamientos urbanos por un período mínimo de 30 años de acuerdo a la vida estimada de los paneles e inversor además de evitar las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero de los autos a los cuales se reemplazaría.

CONCLUSIONES

Los automóviles eléctricos pueden contribuir a que una ciudad sea más limpia, silenciosa y confortable. Para que además sea sustentable en términos globales deben cumplirse conceptos de diseño estrictos, sobre todo en el peso de los móviles y fundamentalmente contar con fuentes de energía eléctrica renovables o de alta eficiencia y bajas emisiones.

En este punto van a tener un rol importante la generación distribuida, las redes eléctricas inteligentes y las implementaciones V2G (Vehicle to Grid) en las que la capacidad de almacenamiento de las baterías de los vehículos es usada como amortiguador y reserva para las fluctuaciones en el suministro de energía proveniente de solares y eólicos de carácter eminentemente alternativo.

La característica modular de los paneles fotovoltaicos hace que la instalación sea fácilmente escalable a potencias mayores, o sea que un usuario puede empezar con pocos paneles y después agregar más de acuerdo a su capacidad adquisitiva.

En la transición hacia la electrificación van a convivir un tiempo importante con los vehículos de combustión interna de alto rendimiento y con los híbridos.

A la alta eficiencia inherente a los motores eléctricos se le suma un escaso o nulo mantenimiento de la planta motriz debido a que todos los movimientos son de rotación.

Es muy difícil competir con la alta densidad de energía de los hidrocarburos (aprox. 12.000 Wh/Kg) contra 100 a 150 Wh /Kg de las baterías de litio o apenas 37 Wh/Kg de las baterías de plomo-ácido de electrolito absorbido utilizadas.

Es el avance en la tecnología de acumuladores lo que va a definir el crecimiento del sector. Al día de hoy las baterías de litio siguen siendo la alternativa dominante, siendolos próximos pasos a seguir la eliminación del cobalto y la entrada en producción de las baterías de electrolito solido que representan un aumento considerable en la densidad energética, en el número de ciclos de descarga y en la seguridad (Braga, Goodenough, et al, 2018). Si bien por el momento no está claro que material sustituirá al litio en el futuro, son promisorias las investigaciones en baterías de calcio (Palacin, et al, 2018), Zinc Aire (Lee et al, 2013) y Sodio en estado sólido (Zhou, Goodenough et al, 2018).

También los avances en supercapacitores permiten implementar mayores corrientes de frenado regenerativo sin afectar a las baterías, lo que se traduce en un importante aumento de rendimiento en ciclos urbanos.

Las mediciones realizadas en el prototipo permiten inferir un comportamiento eficiente a pesar del elevado peso. Esto permite afirmar que con materiales livianos para la carrocería, baterías livianas, motores de imanes permanentes y controladores de alta eficiencia el consumo puede ser notablemente mejorado, y si además se disminuyen los tamaños de estos móviles urbanos se puede bajar de 50 Wh/Km con facilidad, que comparados con los 1100 Wh/Km que consume en promedio en recorrido

urbano un auto mediano a gasolina actual da una idea del ahorro en combustible, emisiones, ruido y ocupación en planta que se lograría con estos vehículos.

La sinergia que se produce entre los automóviles eléctricos y la energía solar fotovoltaica hacen altamente recomendable el “apalancamiento” mediante créditos subsidiados de la compra de un automóvil eléctrico con una cantidad de paneles fotovoltaicos suficientes para abastecerlo de energía en algún porcentaje a determinar (en los casos en que hay techos o espacio disponible). También es aconsejable para nuevas construcciones tener en cuenta la orientación e inclinación de los techos para facilitar la incorporación de paneles.

El impacto de la recarga de los autos en redes eléctricas débiles, puede ser considerable. La producción distribuida de energía fotovoltaica permite minimizar este impacto, y hasta hacerlo positivo, ya que la red puede verse fortalecida si hay excedentes de energía. En general con 1kWp de paneles se cubre con creces el recorrido urbano diario típico de un sedán para cuatro personas en ciudades medianas, para ciudades grandes el esquema es especialmente adaptable a individuos que viven en countries o barrios periféricos y se desplazan diariamente al trabajo en auto, en estos casos con 2 kWp fotovoltaicos y pequeños autos de unos 50 Wh/Km se pueden recorrer entre 120 a 150 Km. Los resultados favorables obtenidos aconsejan la implantación de esta tecnología en la matriz de transporte de cualquier ciudad.

Una ventaja adicional es la posibilidad de manufactura local de algunos componentes, especialmente si prospera el proyecto de fabricación nacional de baterías de litio (Cabido, 2015), que es el elemento más crítico.

BIBLIOGRAFIA

- Adler Walter, Schoer Karl** – 2006- The German sectoral reporting module on transport and environment-Statistisches Bundesamt Deutschland- DEStatis.
- Bloomberg New Energy Finance (BNEF)**, Electric Vehicle Outlook 2018 (EVO 2018).
- Braga María Elena, Goodenough John et al.** Non-Traditional, Safe, High-Voltage Rechargeable Cells of Long Cycle Life. 2018
- British Petroleum (BP)**, British Petroleum Statistical Review of World Energy Jun 2018.
- Cabido Daniel**- 2015- Aportes para construir una estrategia regional de defensa soberana del litio como recurso estratégico- Centro de Estudios Avanzados- UNC – Edit. Advocatus – Córdoba.
- Etchegaray, Georgina;** Pierantonelli, Mario; Picca, Gustavo; Sassia, Gerardo; Barufaldi Gastón – 2013 Movilidad Urbana Sustentable, Alternativa Eléctrica, Rendimiento Mejorado – III Congreso de Ambiente y Energías Renovables – UNVM- ISBN 978-987-1930-11-1
- International Energy Agency, IEA.** World Energy Outlook 2017.
- International Energy Agency, IEA.** Global Electric Vehicle Outlook 2018, GEVO 2018.
- International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, OICA.** World Vehicles in use- All vehicles. 2018.
- Kempton W.** and Tomic J – 2005 – Vehicle to grid fundamentals – Journal of Power Sources 144 – 1 June 2005 –pp 268-279- USA.
- Lee Dong Un et al,** Advanced Extremely Durable 3D Bifunctional Air Electrodes for Rechargeable Zinc-Air Batteries. 2013.
- Matsushita** Technical Journal – August 2006 – Development of Lithium-ion batteries.
- Páginas oficiales** de empresas automotrices.
- Palacin Rosa, et al,** Electrochemical Calcium extraction from 1D-Ca₃Co₂O₆. Instituto de Ciencias de Materiales de Barcelona, CSIC. 2018
- Pierantonelli Mario,** Prato Laura, Rodríguez Marta, Picca Gustavo, Riera Javier, Sassia Gerardo- 2009- Transporte Personal Urbano, alternativa eléctrica –Art. 02-029 - I Congreso de Ambiente y Energías Renovables -. Universidad Nacional de Villa María (UNVM)- ISBN 978-987-1253-62-3.
- Pierantonelli Mario,** Barral Jorge, Gudemos Emilio- 2013 – Matriz de recursos energéticos de la Provincia de Córdoba- Devalis Sergio – 149. 175- Pautas para el desarrollo de la energía solar en Córdoba – Córdoba- ISBN 978-987-1847-11-2
- Pierantonelli Mario,** Sassia Gerardo, Paris Marcelo- 2011- Movilidad Urbana Sustentable, Alternativa Eléctrica - II Congreso de Ambiente y Energías Renovables- Pag. 372-384 – Universidad Nacional de Villa María – ISBN 978-987-1253-89-0.

Rotter, Germán-Evolución de la Energía Solar en Chile. 1° Encuentro Nacional sobre Generación Eléctrica Distribuida mediante Energías Renovables. Mayo 2016 - San Miguel de Tucumán.
Secretaría de Energía y Minería de la Nación. Balance Energético Nacional. BEN 2016.
Sperling D – 1997- Electric vehicles and sustainable transportation –Scientific American – January 1997.
Verein Jean Pierre - La bicicleta – Centre National de la Recherche. -Mundo Científico N° 10.
www.baratecsolar.com.ar
www.clima.omixom.com/graficos.php
www.enertik.com.ar
www.greencarcongress.com – Technologies for Sustainable Mobility.
www.photon-magazine.com/newsletter
www.tecsolar.com.ar
www.toyota-global.com/innovation/.../Grenoble/
Zagorodny Juan – 2012 – Argentina necesita leyes de Vehículos eléctricos- Foro Estratégico para el Desarrollo Nacional- Buenos Aires, 14 de junio de 2012.
Zhou Widong, Goodenough John et al. Rechargeable Sodium All-Solid State Battery. 2018.

ABSTRACT:The aim is to investigate an urban mobility scheme based on electric vehicles powered by solar energy in terms of consumption, emissions, effects on energy and transport matrices, sustainability, as well as the perception of society.

Two parallel lines of investigation are adopted; a documentary with follow-up and technical analysis of the models presented by the automakers and an experimental one that involves making measurements on electric vehicles and a photovoltaic installation connected by means of an on grid inverter to the electricity grid, which allows to defer the load of the solar daily cycle vehicle and quantify the net energy balance.

The distributed production of photovoltaic energy would allow to minimize the impact of the load of the cars, since the network can be strengthened if there is surplus of energy or if the batteries of the car are used as backup, increasing the synergy between the parts.

Keywords: Electric car, distributed generation, synergy, sustainability

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFAZ PARA SISTEMA DE MONITOREO Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE RADIACIÓN Y TEMPERATURA EN UN PARQUE FOTOVOLTAICO EN SALTA

M. Villena, V. Serrano, C. Sarabia, C. Caniza, V. Javi y F. Zutara
Instituto de Investigaciones en Energías no Convencionales (INENCO).
Consejo de Investigaciones de la U.N.Sa (CIUNSA).
Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150. C.P. 4400 – Salta
Dirección de Mantenimiento. Poder Judicial de Salta
Tel. 03871-4255424 – Fax 02387-4255449 e-mail: maiver@inenco.net

Recibido 15/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: En este trabajo se detalla el desarrollo e implementación de una interfaz electrónica para un sistema de monitoreo y procesamiento de datos de radiación y temperatura mediante una computadora de placa reducida (*Single Board Computer - SBC*) en una instalación del proyecto IRESUD, en el mismo se emplea un radiómetro fabricado por la CNEA y un circuito integrado de precisión para el sensado de la temperatura. La adquisición de datos y el procesamiento de la información aprovecha las capacidades del microprocesador ARM Cortex-A53 que comanda la SBC. Debido a la ausencia de conversión analógica-digital en la SBC se desarrolló una interfaz para el acondicionamiento de la señal y conversión A/D. Mediante el empleo de librerías y potentes paquetes de *software* libre como R y Python, los datos de las mediciones de radiación y temperatura, son almacenados con un motor de base de datos relacional, para facilitar las consultas posteriores para el procesamiento de toda la información recolectada.

Palabras clave: radiación solar, tecnología, interfaz, procesamiento de datos

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se expone el desarrollo de un sistema unificado destinado al monitoreo, control, almacenamiento y procesamiento de datos de radiación y temperatura en el Poder Judicial de Salta donde se encuentra instalado un parque fotovoltaico del proyecto Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos (IRESUD).

En desarrollos de esta naturaleza se hace necesario el empleo de computadoras para el procesamiento de toda la información que se pretende relevar. Con el advenimiento de la SBC, computadora de placa reducida o de una sola placa, la instalación de este tipo de sistemas se hace más accesible, no sólo en términos económicos sino que también minimiza el espacio necesario para su emplazamiento, por tratarse de sistemas electrónicos embebidos, además de su bajo consumo energético. En la Figura 1 se muestra el esquema general del sistema planteado, en la misma se puede apreciar que los sensores están conectados a una interfaz que realiza el acondicionamiento de las señales para su tratamiento en la SBC, el diseño e implementación de la misma se detalla a lo largo del trabajo. En la SBC, se pueden aprovechar las capacidades de un potente microprocesador como es el ARM Cortex-A53 el cual es administrado por un sistema operativo (GNU/Linux) en el cual se pueden instalar un motor de base de datos (*Data Base Management System - DBMS*) un potente procesador estadístico (R) y un lenguaje de *scripting* (Python) para el desarrollo de todas estas tareas.

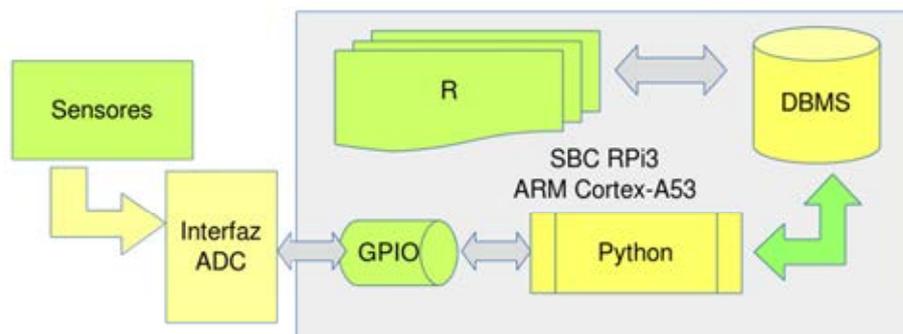


Figura 1: Esquema General del Sistema

Lugar de emplazamiento

Desde mayo de 2017 funciona un sistema fotovoltaico de 2,8 kW conectado a red en la Escuela de la Magistratura (EM) del Poder Judicial de Salta como parte del Proyecto Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la IRESUD. El acta acuerdo entre la EM y la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) prevé un largo comodato que da lugar a acciones de investigación y capacitación a tanto a la Dirección de Mantenimiento del Poder Judicial de Salta como al Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) y a la Universidad Nacional de Salta (U.N.Sa). Efectivamente, desde su puesta en marcha el INENCO y la U.N.Sa, desde el proyecto de Investigación CIUNSa N° 2338, mantienen vínculos para avanzar, por ejemplo en la instalación de un radiómetro fotovoltaico que complemente la información de energía y potencias producidas.



Figura 2: Sistema Fotovoltaico conectado a red interna en el Poder Judicial de Salta.

Las instalaciones del proyecto IRESUD son una referencia, coadyuvando a la difusión de las nuevas tecnologías renovables a nivel nacional. Las ventajas y la potencialidad del uso en Argentina de los sistemas fotovoltaicos se describen ampliamente, sin embargo, su aprovechamiento a nivel de la población en general es incipiente. Son múltiples las aplicaciones según las diferentes escalas de las instalaciones: desde plantas de potencia licitadas por el Plan RenovAr, instalaciones de mediano o pequeño porte hasta micro sistemas (KPMG, 2017, Durán J., 2014; Rocabado S. et al, 2015; Āourím P. et al, 2015). La instalación ubicada en la Escuela de la Magistratura (EM) del Poder Judicial de Salta es visitada por el público en general y personas interesadas en conocer la tecnología, pero cumple

también una función de “tópico generativo” de ejercicios formativos tanto para los técnicos del Poder Judicial como para los estudiantes e investigadores de la U.N.Sa (Jacob S.B. et al, 2014). Este atributo, no es menor dado el creciente impulso de las energías renovables en el país.

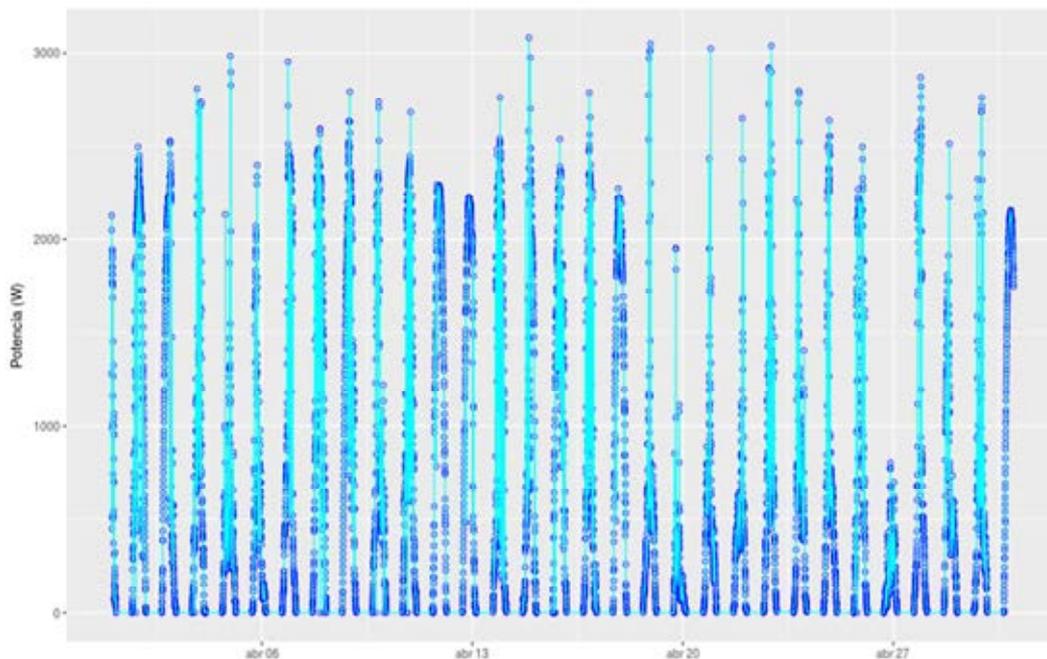


Figura 3: Potencia SF producida (Abril, 2015)

El generador fotovoltaico de 12 módulos de 240 W cada uno, Sunmodule Poly versión 2.0 y 2.5 Frame SolarWord se integra al edificio de la EM sobre su fachada Norte alcanzando una superficie total de unos 20m² bajo la modalidad de aleros, con una inclinación de 28°. El inversor es un AEG de 2,8 kW provisto por el proyecto IRESUD al igual que los módulos. En la Figura 3 se muestra la producción de un mes típico del otoño salteño (abril de 2015) y en la Figura 4 la producción anual de potencia.

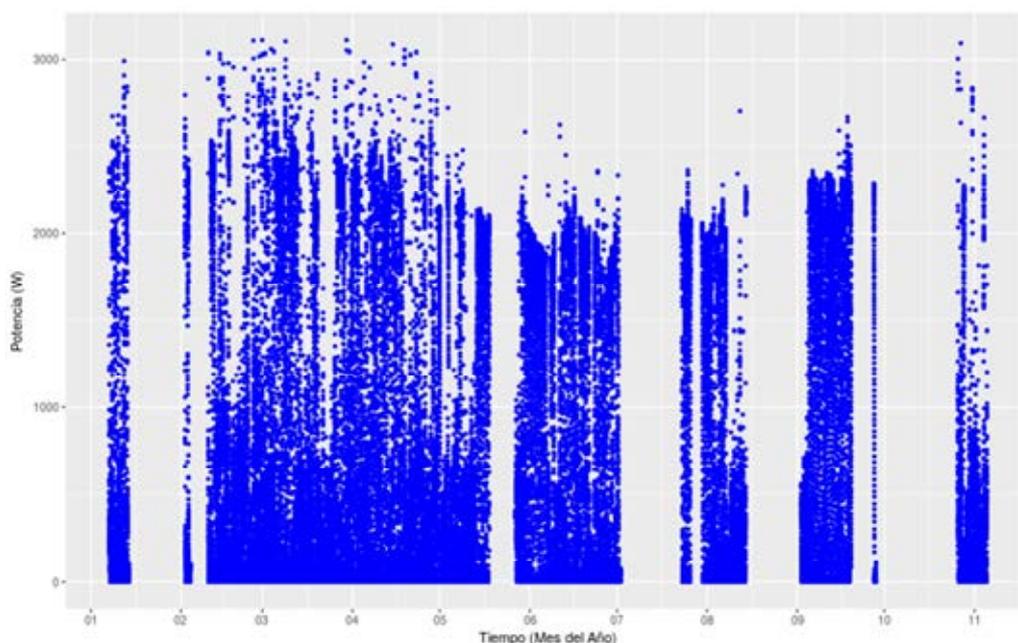


Figura 4: Producción anual de potencia (2015)

DESARROLLO DEL SISTEMA

Una SBC es un dispositivo del tamaño de una tarjeta de crédito, contiene un microprocesador rodeado de memoria RAM y un controlador de video en un solo circuito integrado *System on a Chip* (SoC). Con origen en la Universidad de Cambridge, la fundación *Raspberry Pi* ha producido desde 2011 tres generaciones de SBC, la última versión (RPi v3) contiene un microprocesador del fabricante Broadcom (BCM237) un SoC que contiene un procesador de cuatro núcleos basado en un ARM Cortex-A53 de 64 bits, que opera a 1.2 GHz con 1GB de RAM, con interesantes opciones de conectividad integrados: un puerto Ethernet y dos interfaces inalámbricas: *Wi-Fi* y *Bluetooth Low Energy*. Estas opciones de conectividad permiten la construcción de un sistema que puede estar simultáneamente conectado a una red LAN, crear un punto de acceso inalámbrico y la opción de una eventual conexión Bluetooth en caso de ser necesario.

Sus puertos de Entrada/Salida de Propósito General (*General Purpose Input Output* - GPIO) brindan las conexiones necesarias para transformarlo rápidamente en un dispositivo apto para la computación física. La única desventaja en este último punto es que carece de un Conversor Análogo/Digital (*Analog Digital Converter* - ADC) aunque en este aspecto, se puede emplear un ADC externo que se comunica con la SBC mediante el protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI) tal como se expone en este trabajo.



Figura 5: Interfaz desarrollada conectada a una SBC Raspberry Pi v3

El radiómetro empleado es del tipo fotovoltaico de silicio monocristalino de bajo costo fabricado por el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). La respuesta del radiómetro es proporcional a la irradiancia recibida, por lo tanto para medir la radiación solar se debe medir la tensión de salida del radiómetro (M) lo cual supone el desarrollo de una interfaz ad-hoc para el acondicionamiento de la señal. Al requerimiento original, se agregó la medición de temperatura inmediatamente debajo del alero, como dato de interés. El desarrollo de la interfaz fue realizada en el marco del Proyecto CIUNSa N° 2319.

Radiación Solar en el NOA

Las provincias del noroeste argentino (NOA) presentan una alta radiación solar, principalmente Salta y Jujuy se caracterizan por tener mayor radiación (Figura 6) (Laspiur et al., 2013); esta característica fundamental del recurso solar permitió que se proyectaran grandes instalaciones de parques solares, como el de Cauchari en la puna Jujeña y el de Cafayate en los Valles Calchaquíes, los cuales actualmente se encuentran en construcción.

El registro de los datos de radiación es un aspecto de mucha importancia para proyectos en desarrollo, como así también para futuras instalaciones. El prototipo que se encuentra en ensayo, con su correspondiente interfaz y sensor de radiación que serán instalados en la Escuela de la Magistratura (EM) del Poder Judicial de Salta, donde actualmente funciona un parque Fotovoltaico de 2.8 kW, El sensor será montado en el mismo plano de inclinación de los paneles, lo cual permitirá obtener un relevamiento de radiación global que servirá para cotejar con los datos de generación eléctrica del parque.

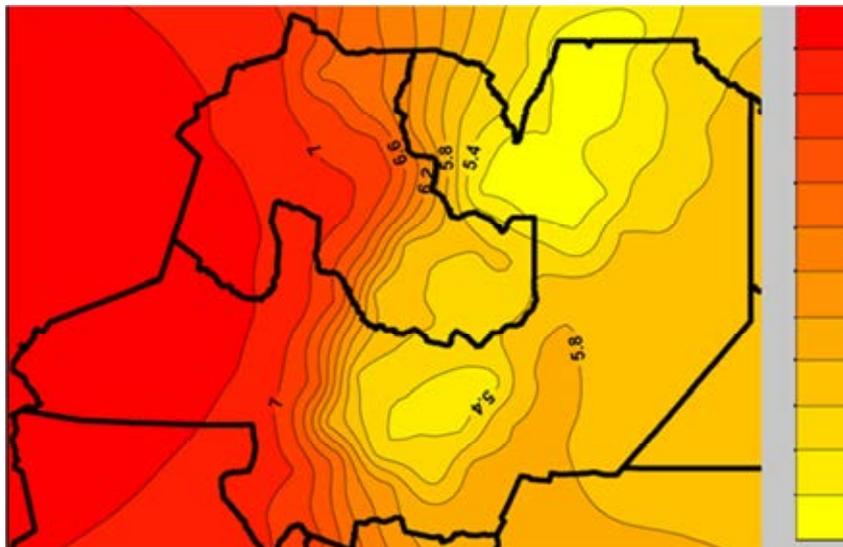


Figura 6: Mapa de líneas de iso-radiación solar global media anual para Salta y Jujuy (en KWh/m^2)

El incremento de la corriente de generación en máxima potencia en los paneles fotovoltaicos, determinados por la irradiancia solar, implica que la recolección de datos con este sistema serán de mucha utilidad para formular análisis y curvas I-V, los datos relevados también permitirán generar un mapa de irradiancia específica del lugar, pensando en nuevos proyectos que permitan ampliar el parque Solar de la EM.

Temperatura Ambiente y Generación Fotovoltaica

La temperatura ambiente es un factor importante para la generación eléctrica con paneles fotovoltaicos, puesto que, de cierto modo, modifica los parámetros de las curvas características I-V, en la medida que se incrementa la temperatura de la celda provoca una disminución de la tensión de generación en aproximadamente $2.45 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, mientras que la corriente de cortocircuito apenas se ve afectada. Estos valores pueden ser pequeños, sin embargo a medida que aumenta la temperatura ambiente hasta 30°C aproximadamente, la potencia en el punto de Máxima potencia del panel disminuye entre 11W y 14W (Radziemska, 2003)

Por otro lado, los gradientes de temperatura entre las distintas celdas que forman un módulo fotovoltaico, provocan ineficiencia en su comportamiento, éstas producen un efecto denominado *dispersión de parámetros*, que ocurre cuando distintas células conectadas entre sí, trabajan en distinto punto de funcionamiento y, por lo tanto, con distinta curva característica.

En la EM se montará un circuito integrado de precisión LM35 que registra valores de temperatura ambiente, este sensor se ubicará por debajo de los paneles lo más cercano posible para relevar datos de temperatura que nos den un indicio de cómo es el comportamiento en la generación eléctrica respecto del incremento de la temperatura. La base de datos relevada del lugar será usada como uno de los parámetros a tener en cuenta en futura ampliación del parque que además servirán para mejorar el sistema.

DESARROLLO DE INTERFAZ

Uno de los aspectos expuestos inicialmente, en cuanto a las limitaciones en el uso de una SBC, es la ausencia de conversión analógico-digital. Para la adquisición de datos se tuvo que incluir un chip dedicado entre los sensores y la SBC tal como se presenta en el esquema general de la Figura 1. Se detallan a continuación los componentes de la interfaz.

Conversión A/D

El circuito integrado MCP3008 (Microchip, 2008) posee 8 canales de conversión con una resolución de 10 Bits. La comunicación con la placa SBC se realiza mediante el protocolo SPI, adoptando como tensión de alimentación y tensión de referencia el valor de 3.3V siguiendo el esquema de conexionado que se muestra en la Figura 7.

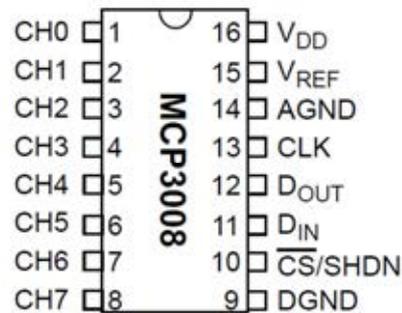


Figura 7 : Pin-Out del ADC MCP3008P

La resolución del MCP3008 se determina a partir de:

$$Res = Vref / (2^n - 1) = 3.3V / 2^{10} - 1 = 0.0032V \quad (1)$$

$$Res = 3.2mV$$

SENSORES

Sensor de Temperatura - LM35

Para medir la temperatura se eligió el circuito integrado de precisión LM35 (Texas, 2018). Este circuito entrega una tensión de salida proporcional a una determinada temperatura expresada en grados centígrados. El rango de medición va desde los -55°C hasta los 150°C . El encapsulado seleccionado es de tres terminales como se observa en la figura 8. La disposición de los pines es la siguiente:

1. VCC: Tensión de alimentación. El valor típico es de 5V.
2. Salida: Entrega una tensión de 10mV por cada $^{\circ}\text{C}$ de incremento en la temperatura.
3. Ground: Conexión al nodo de referencia del circuito.

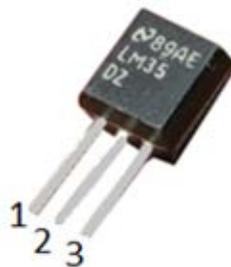


Figura 8: Pin-Out del sensor de temperatura LM35

Para una temperatura de 25°C y teniendo en cuenta que el factor de escala del LM35 es $C=10.0$ mV/°C, se obtiene una medida equivalente a:

$$V_{temp} = 25^{\circ}C * 10.0 \text{ mV}/^{\circ}C = 250\text{mV} \quad (2)$$

Sensor de radiación

La señal que provee el sensor de radiación tiene una sensibilidad de $10 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, la tensión que se mide para radiación estándar es:

$$V_{rad} = 1000\text{W}/\text{m}^2 * 0.01\text{mV}/\text{W}/\text{m}^2 = 10\text{mV} \quad (3)$$

Considerando la resolución del MCP3008 y la tensión de salida del sensor de radiación para el valor estándar se advierte que el valor ingresado al ADC es muy pequeño.

Interfaz sensor de radiación – ADC

Para acoplar las señales en forma correcta, de modo tal que la señal provista por el sensor cubra todo el rango de entrada del conversor A/D, se fabricó una interfaz con una ganancia en tensión $A_v = 200$. Con este valor se obtiene para un valor máximo de radiación de $1500\text{W}/\text{m}^2$ con una tensión de 3V para la entrada del MCP3008. Con este acondicionamiento de la señal se consigue reducir los errores de conversión mejorando la resolución.

La interfaz se diseñó en base al circuito integrado LM358 (Texas, 2000). Este dispositivo consta de 2 amplificadores operacionales sobre el mismo encapsulado. En el primer amplificador se montó la etapa seguidor de tensión (*buffer*), cuya función es la de presentar una alta impedancia a la señal del sensor de radiación para eliminar el “efecto carga”. Esta topología tiene una ganancia en tensión, $A_v=1$. Sobre el segundo amplificador operacional se diseñó la etapa de amplificación con la configuración no-inversora. Para esta topología la ganancia en tensión es: $A_v = 1+R_4/R_3$.

En la interfaz se incorpora la conexión del sensor LM35 directamente al conversor MCP3008 sin ninguna adaptación, ya que en los ensayos se obtuvieron resultados adecuados comparándolos con el instrumento patrón.

Diseño de la interfaz

El circuito se diseñó con KiCad (KiCad, 2018), con licencia *General Public License – GNU*, potente herramienta de software libre aplicada al diseño electrónico. La Figura 9 presenta el esquemático del diseño.

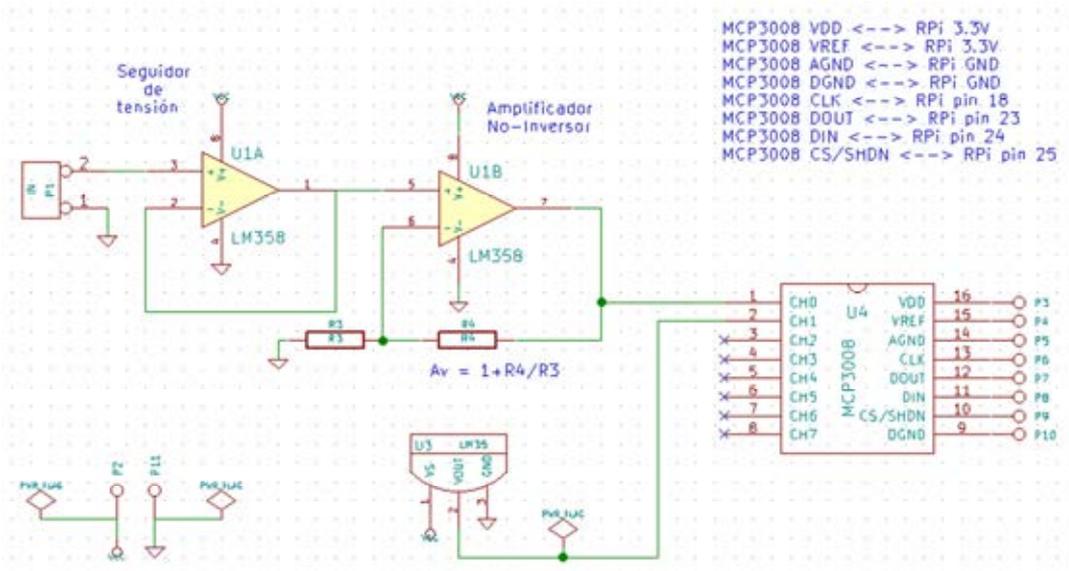


Figura 9: Circuito esquemático de la interfaz desarrollada con KiCad

En la Figura 10 se puede apreciar la versión final de la interfaz implementada.

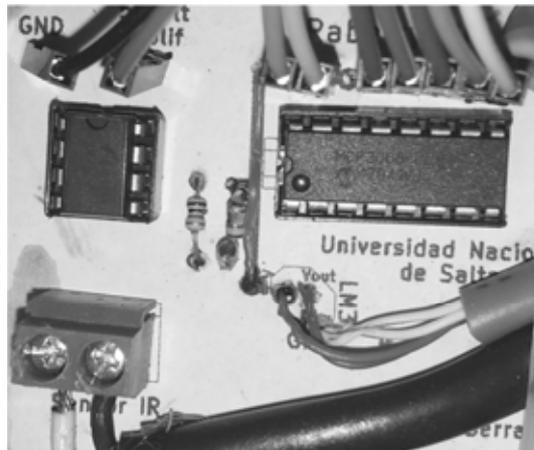


Figura 10: Interfaz implementada.

Calibración del amplificador

El amplificador fue ensayado para diferentes valores de tensión de entrada (μV) equivalentes a los valores que entrega el radiómetro, con los datos obtenidos y mediante las funciones de regresión lineal incluidas en R se obtuvo la relación que verifica la ganancia de la interfaz desarrollada. La figura 11 muestra la relación entrada/salida de la interfaz y la calibración aplicada, el coeficiente de esta relación es 200.8 (ganancia del amplificador)

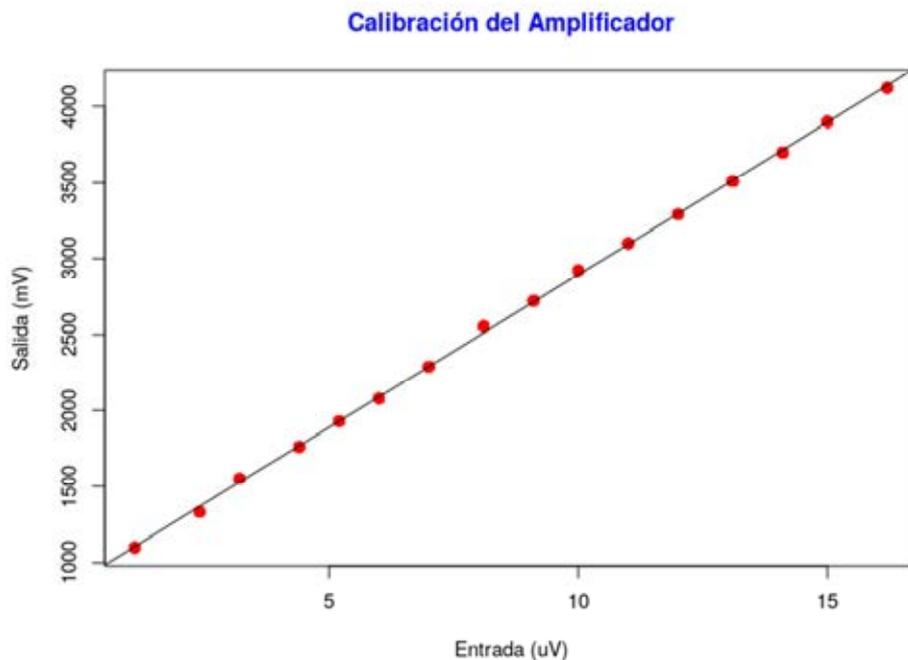


Figura 11: Calibración del amplificador

Software e implementación en SBC RPi

La fundación Raspberry Pi recomienda el uso de Raspbian, un sistema operativo derivado de la distribución Debian GNU/Linux, en el sitio oficial se ofrecen dos versiones: la primera de ellas incluye una interfaz gráfica (*desktop*), destinada al usuario novel que recién comienza a interactuar con

una SBC. Para los entornos en producción no se recomienda la instalación de entornos gráficos: no solo para morigerar la carga del sistema operativo en la SBC, sino también, haciendo foco en la seguridad, implementado un acceso solo a nivel de *shell* del sistema operativo. En este trabajo se seleccionó la versión *Lite* de Raspbian, una distribución basada en Debian GNU/Linux 9 (*Stretch*) la última disponible.

SPI – MCP3008 y RPi

Uno de los primeros aspectos para la implementación de la interfaz fue la administración del MCP3008, un circuito integrado que admite hasta 8 canales analógicos. Este dispositivo fue seleccionado pensando en integrar a futuro una mayor cantidad de sensores, el MCP3008 trabaja con el protocolo SPI y la comunicación se implementa a través de cuatro cables. El dispositivo es capaz de obtener 200 ksp/s (kilo muestras por segundo) el tiempo necesario entre la muestra y la transferencia de la información debe ser al menos 1.2 ms (milisegundos) Los puertos que se usan son: CSN (*Chip Select*), DIN (*Data In*) DOUT (*Data Out*) y CLOCK (reloj) (Figura 7), los cuales deben acoplarse a los pines CS, MOSI, MISO y Clock, respectivamente, en la SBC (Figura 9). El dato digital que se obtiene en RPi está dado por:

$$\text{NúmeroDigital} = (2^{\text{resolución}} / V_{\text{ref}}) * V_{\text{ent}} \quad (4)$$

El control de los tiempos necesarios para la toma del dato, muestro y posterior transmisión a la SBC desde MCP3008 se deben hacer mediante un *driver* que administre la ejecución del protocolo SPI. Existen distintas maneras de implementar este control en RPi, la primera de ellas es mediante la librería *spidev*, que es provista en Raspbian; otra opción es mediante las librerías que proveen los fabricantes como Adafruit, el cual ofrece librerías para Lenguaje C y también para Python (en el presente trabajo utilizamos esta última). Una vez instalada la librería, desde la aplicación desarrollada, se pueden obtener las lecturas de los 8 canales del MCP3008 en una tupla de Python. El dato numérico obtenido según la Ecuación (4) debe ser transformada en el Valor correspondiente al sensor adecuado (temperatura o radiación, en nuestro caso) aplicando las expresiones (2) y (3)

Bases de Datos Relacionales y RPi

La potencia de una distribución como Raspbian permite una rápida implementación de un gestor de bases de datos relacional, en nuestro caso se optó por el uso de SQLite, puesto que las tablas que se generan con los datos provenientes de los sensores no son muchas y este motor brinda una simplicidad importante al implementar toda la base de datos autocontenida en un solo archivo, esto facilita las tareas de *backup*. Sin embargo, cabe mencionar que en la medida que los requerimientos crecen, también se puede optar por MariaDB (*fork* de MySQL) o PostgreSQL, dos DBMS que brindan mayores capacidades cuando se trata de bases de datos relacionales. En nuestro caso se hicieron pruebas con MariaDB y SQLite, optando por éste último por las razones expuestas anteriormente. Una vez instalado SQLite se agregó en Python la librería que gestiona la conexión con el DBMS y en la aplicación que gestiona la adquisición (descrita en la sección anterior) una vez calibrada la lectura de los datos (radiación y temperatura) los mismos son almacenados en la base de datos correspondiente.

Procesamiento de datos y gestión estadística

Inicialmente el proyecto contemplaba el almacenamiento y gestión de los datos obtenidos, en la nube (*Cloud*), para ello era necesario que la SBC se encuentre directamente conectada a internet preferentemente mediante una red *Ethernet*. Sin embargo las políticas de administración de la red del lugar donde será emplazado el sistema, no recomiendan un acceso directo a internet a la SBC. Tomando en cuenta este aspecto y observando las capacidades del procesador de RPi3 (ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos) se implementó el procesamiento de la información en la misma SBC.

En cuanto al procesamiento de los datos, se utilizó R, un potente paquete de software estadístico, siendo el mas adecuado para nuestro propósito: la ejecución de *scripts* en R hacen que su ejecución pueda ser controlada directamente a nivel de la *shell* del sistema operativo. Además cuenta con las correspondientes librerías para la conexión a distintos DBMS, incluyendo SQLite, las librerías no solo gestionan la conexión sino que permiten abstraerse del DMBS utilizando consultas típicas en *Structured Query Language* (SQL). La figura 12 muestra un gráfica generada por R con las mediciones de irradiación global horizontal, registradas en los primeros días de la segunda quincena de agosto de 2018.

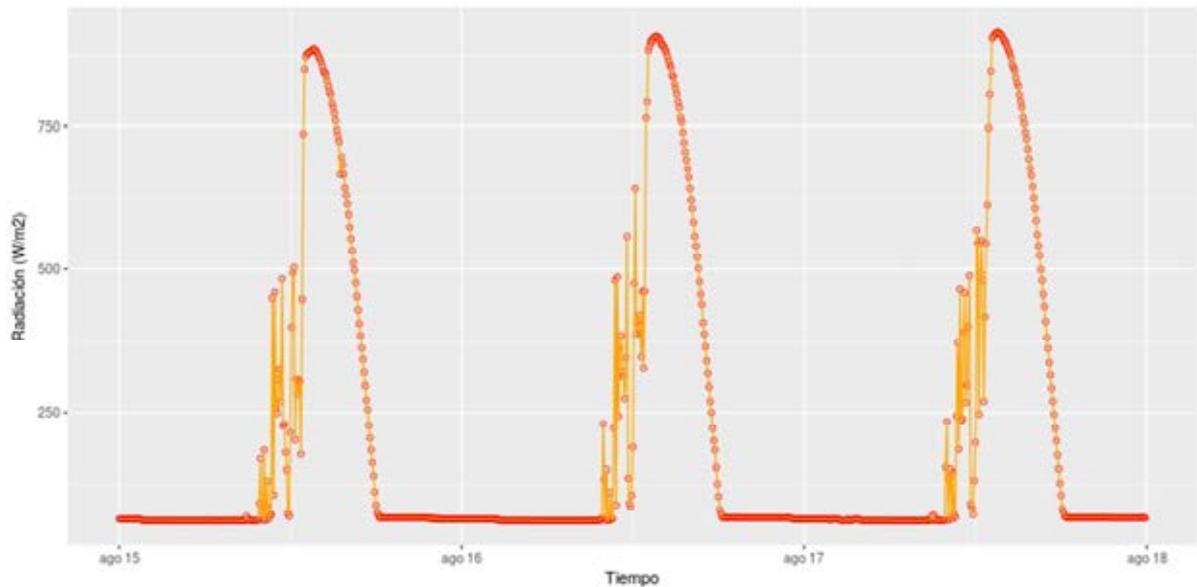


Figura 12: Radiación solar en Salta (Agosto, 2018)

Al momento de la escritura de este trabajo, las mediciones del prototipo desarrollado están siendo contrastadas con otras observaciones por equipos similares instalados en el INENCO, antes de su emplazamiento definitivo en la EM. La figura 13 muestra una serie de mediciones de temperatura (registradas en los mismos días que las de radiación) procesadas con el software instalado en la SBC.

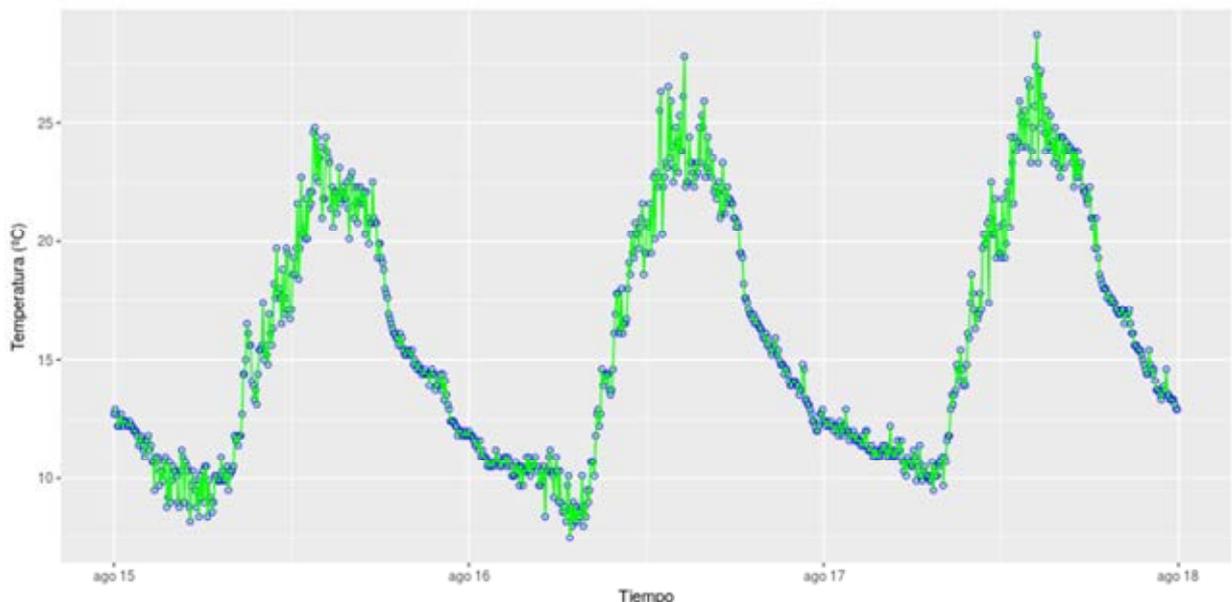


Figura 13: Temperatura en Salta (Agosto, 2018)

Las gráficas y los datos colectados en la base se acceden vía web, tanto para monitoreo como para descarga, para ello se instaló un web server en la SBC, al cual puede accederse mediante un navegador web desde cualquier dispositivo móvil (*laptop, tablet, smartphone*) puesto que la RPi3 está configurada para actuar como *Access Point (AP)* en una *Wireless LAN*, a través de su interfaz inalámbrica *on-board*.

CONCLUSIONES

Los factores característicos de generación fotovoltaica dependen siempre del lugar donde se instalen los parques solares, el relevamiento de los valores de irradiancia en el lugar y la toma de datos de la temperatura ambiente es fundamental para el desarrollo de proyectos más eficientes, contrarrestando las consecuencias que podrían afectar una generación Fotovoltaica.

El uso de sensores muchas veces requiere la adaptación de la señal que generan, el desarrollo de la interfaz presentada permite la adquisición de datos, el coleccionado de los mismos se debe llevar a cabo mediante un motor de base de datos, puesto que el empleo de un DBMS permite realizar consultas mediante un lenguajes estándar (SQL). Para el procesamiento de los datos hoy se cuenta con poderosas herramientas de software libre que facilitan el desarrollo de cualquier sistema de este tipo. Los lenguajes de *scripting* han tenido un desarrollo tan importante, que el vínculo con el *hardware* (SBC y sus puertos de entrada/salida GPIO) como así también la comunicación con el DBMS y herramientas estadísticas (tipo R) se llevan a cabo mediante librerías desarrolladas por la comunidad de software libre, con las ventajas que esto implica. Precisamente las licencias del software libre no solamente brindan una ventaja en la disponibilidad, sino también la posibilidad de acceder al código fuente de estos desarrollos, lo que se garantiza la transmisión de conocimiento para cualquier interesado en el tema.

Los datos obtenidos en desarrollos como el planteado en este trabajo, proporciona una serie de ventajas para mejorar el sistema ya instalado y a futuro, poder proponer modificaciones en nuevos parques solares.

NOMENCLATURA

DBMS – *Data Base Management System*

INENCO – Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional

IRESUD – Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos

GPIO – *General Purpose Input Output*

SBC – *Single Board Computer*

SPI – *Serial Peripheral Interface*

SoC – *System on a Chip*

SQL – *Structured Query Language*

RPi – Raspberry Pi

REFERENCIAS

- Durán J.C., Socolovsky H.P., Raggio D., Godfrin E.M., Jakimczyk J., Martínez Bogado M.G., Diaz F. J., Castro N.E., Pedro G., Sepúlveda O., Argañaraz C., Benítez E., Roldán A., Righini R. (2014). Proyecto IRESUD: interconexión de sistemas fotovoltaicos a La red eléctrica en ambientes urbanos estado de avance a julio de 2014 y primeras mediciones en sistemas piloto. Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la ASADES. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Jacob S.B., Murcia G. J., Branda J.C., Strack J.L., Suárez J.A, Garín E. (2014). Interfaz de monitoreo de un sistema fotovoltaico conectado a la red. Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de ASADES. ISBN 978-987-29873-0-5.

- KiCad (2018). Comenzando en KiCad. (Disponible en: http://docs.kicad-pcb.org/stable/es/getting_started_in_kicad.pdf)
- KPMG (2017). Inversiones en fuentes de generación en el sector eléctrico nacional. Energía, electricidad y servicios públicos. Informe Especial. <http://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2017/06/KPMG.-Informe-Especial.Inversiones-en-Generaci%C3%B3n-Elctricas.-27-de-Junio-2017.pdf>. (Accedido 10/07/2017).
- Kouřím P., Libra M., Poulek V. (2015). Off-grid photovoltaic system for illumination. Res. Agr. Eng. Vol. 61, 2015 (3): 106–110. doi: 10.17221/25/2014-RAE
- Laspiur R., Salazar, G.A., Zerpa, J., Watkins, M. (2013). Trazado de Mapas Medios Anuales de Energía Solar Global, Directa, Difusa y Tilt, Usando la Base de Datos de Swera. Caso de Estudio: Provincias de Salta y Jujuy. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 1, pp. 08.157-08.162
- Microchip Technology Inc. (2008). MCP3004/3008, 2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface.
- Radziemska, E. (2003). Effect of temperature on the power drop in crystalline silicon. Renewable Energy (28); pp. 1-12
- Texas Instruments Incorporated (2018). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. SNIS159H.
- Texas Instruments Incorporated (2000). LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers. SNOSBT3L.

ABSTRACT

This work shows the development and implementation of an electronic interface and a monitoring and processing system of radiation and temperature data using a single board computer, in an installation of the IRESUD project, it uses a radiometer manufactured by CNEA and a precision integrated circuit for temperature sensing. Data acquisition and information processing take advantage of the capabilities of the ARM Cortex-A53 microprocessor that commands the SBC. Due to the absence of analog-digital conversion in the SBC an interface was developed for signal conditioning and A/D conversion. The use of libraries and powerful free software packages such as R and Python, the data of radiation and temperature measurements are stored with a relational database engine, to facilitate subsequent queries for the processing of all the information collected.

Keywords: solar radiation, technology, interface, data processing

CARACTERIZACIÓN ANGULAR AUTOMATIZADA DE SENSORES SOLARES FOTVOLTAICOS

M. Díaz Salazar¹, N. Kondratiuk¹, A. Moreno², M. Martínez Bogado¹, M. Tamasi¹, J. Di Santo

Departamento Energía Solar, Gerencia Investigación y Aplicaciones, CNEA

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

²Agencia Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

Centro Atómico Constituyentes, CNEA Av. General Paz 1499 (1650),

San Martín, Buenos Aires, Argentina. Tel. (011) 6772-7199

e-mail: dsalazar@tandar.cnea.gov.ar

Recibido 09/08/18, aceptado 20/09/18

RESUMEN: Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la respuesta angular de distintos dispositivos fotovoltaicos al variar el ángulo de la radiación solar incidente. La caracterización se llevó a cabo con un nuevo equipo automatizado de respuesta angular desarrollado en el Departamento de Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Se presenta la caracterización de sensores solares y radiómetros fotovoltaicos desarrollados en el DES y dispositivos comerciales similares. Se analizó la repetitividad de la respuesta entre varios sensores de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de una misma serie de fabricación nacional y se comparó la respuesta de los diferentes sensores elaborados en el DES con la de los sensores comerciales de igual principio de funcionamiento. En el caso de los sensores PAR nacionales, el análisis de las mediciones llevó a una modificación del difusor del sensor; la mejora en la respuesta se pudo comprobar ensayando nuevamente los sensores.

Palabras clave: sensores solares gruesos, radiómetro PAR, radiómetro global, respuesta angular, energía solar.

INTRODUCCION

Una de las características de los dispositivos que tienen como principio de medición el efecto fotoeléctrico es la dependencia de la corriente de cortocircuito (I_{cc}) con el ángulo de incidencia de la radiación, esto se conoce como ley del coseno o respuesta angular del dispositivo (Grossi Gallegos, 2004). En el caso de los radiómetros fotovoltaicos esta dependencia debe ser considerada para proporcionar una precisa evaluación del recurso solar. Por otro lado, en el caso de los sensores solares de posición se hace una medición indirecta de la posición del Sol a partir de su relación con la I_{cc} a través de la ley del coseno. Lo ideal es que los sensores y radiómetros fotovoltaicos tengan una respuesta angular que sea exactamente la misma que la ley del coseno, no obstante, la respuesta angular está influenciada por la calidad, dimensiones y construcción de las cúpulas. La caracterización angular de los distintos dispositivos nos proporciona información que permite hacer mediciones más confiables ya que por ejemplo se puede definir el error direccional del dispositivo así como el campo visual (FOV, por sus siglas en inglés) del mismo y desde el punto de vista de la investigación y el desarrollo brinda información fundamental para tomar decisiones en cuanto al diseño de los dispositivos.

En el Departamento de Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se realiza la caracterización angular de los dispositivos de fabricación nacional desde hace algunos años como fue presentado en Moreno et al., 2016. Hasta el momento el ensayo se llevaba a cabo utilizando una base mecánica y la adquisición de los datos se realizaba de forma manual, debido a esto, completar el ensayo requería mucho tiempo lo cual era una desventaja si se querían hacer análisis de la

respuesta de muchos dispositivos para iguales condiciones de funcionamiento. Con el objetivo de disminuir los tiempos requeridos para ensayar los dispositivos y aumentar la precisión de las mediciones se desarrolló un equipo de medición automatizado que permite variar el ángulo de incidencia de la radiación en dos ejes y adquirir la salida del dispositivo en cada punto.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la respuesta angular de distintos dispositivos fotovoltaicos al variar el ángulo de la radiación solar incidente y presentar el equipo automatizado de respuesta angular desarrollado en el DES que se utilizó para el ensayo. Se presenta la caracterización de sensores solares y radiómetros fotovoltaicos desarrollados en el DES y de sensores comerciales con similares características. Primeramente se detallan las especificaciones de los diferentes sensores solares y radiómetros ensayados, la configuración del ensayo y el procedimiento de la medición. Luego se comparan las respuestas de los diferentes sensores medidos bajo las mismas condiciones, se discuten los resultados obtenidos y se analizan las ventajas de la automatización del ensayo.

CARACTERIZACIÓN ANGULAR

Caracterización de respuesta angular

La caracterización angular consiste en medir la señal de salida del sensor al variar el ángulo de incidencia de la radiación para validar que el sensor responde según la regla del coseno y verificar así el correcto funcionamiento del mismo. Esta medición se define como respuesta angular y se puede medir tanto en condiciones AM0 (1367 W/m^2) o AM1.5 (1000 W/m^2) dependiendo si los sensores son para aplicaciones espaciales o terrestres. Una representación esquemática de la disposición del sensor y la lámpara se puede observar en la Figura 1, al mantener la fuente de luz en un ángulo fijo y variar la inclinación del sensor, el ángulo de elevación de la base se corresponde con el ángulo cenital del Sol.

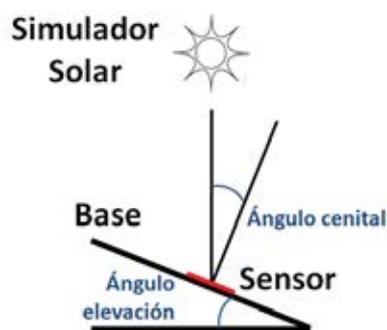


Figura 1: Representación esquemática de la medición de respuesta angular al variar el ángulo de elevación de la base.

Caracterización de simetría

La caracterización en simetría consiste en medir la señal de salida del sensor al variar el ángulo acimutal (rotación) para cada uno de los ángulos de elevación considerados en la respuesta angular, esta medición se hace en condiciones AM0 o AM1.5 dependiendo de la aplicación de los sensores como se comentó anteriormente. El ángulo acimutal se varía hasta completar una vuelta completa de 360° . Una representación esquemática de la disposición del sensor y la lámpara se puede observar en la Figura 2.

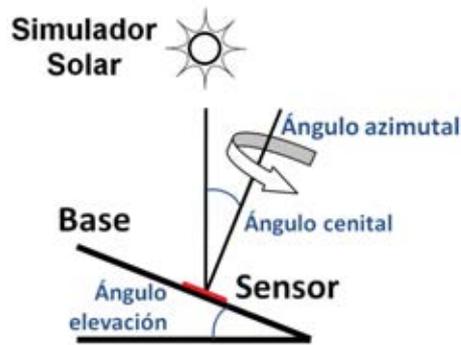


Figura 2: Representación esquemática de la medición de respuesta angular al variar el ángulo acimutal.

Con estas mediciones se pueden determinar parámetros importantes del desempeño de los sensores como por ejemplo el campo visual, el error direccional en elevación y en acimut, además se puede utilizar para la calibración de los sensores de posición.

CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO

La caracterización angular de los sensores se realizó en el Laboratorio de Caracterización utilizando una base rotatoria desarrollada en el DES, un simulador solar clase A de la marca ScienceTech modelo SS1KW y una unidad de fuente y medición Keithley 2602A (SMU, por sus siglas en Inglés), en la Figura 3 se muestra el equipamiento utilizado en el ensayo.



Figura 3: Equipamiento para medir la caracterización de la respuesta angular.

El simulador solar ScienceTech modelo SS1KW permite simular diferentes condiciones mediante el empleo de filtros, estos modifican la salida espectral de la lámpara para que coincida con las condiciones solares naturales como el espectro AM0 y AM1.5 (Manual ScienceTech). La base rotatoria gira con dos grados de libertad, se utilizaron dos motores paso a paso para proporcionar el movimiento en acimut y en elevación del sensor a medir. Se utilizó una computadora para programar la base rotatoria y adquirir los datos de medición del SMU. Además, se diseñó una interfaz gráfica para definir parámetros de la medición y visualizar los datos adquiridos a medida que se realiza el ensayo.

La Figura 4 muestra un diagrama de flujo de la secuencia de control para manejar los dos motores paso a paso y adquirir los datos de la medición. Desde la computadora se envían los comandos por puerto serie al microcontrolador de la placa Arduino Mega 2560, la interfaz entre el microcontrolador

y los motores está formada por la placa Ramps 1.4 para la electrónica de potencia y los drivers DRV8825 para manejar la corriente que se entrega a los motores.

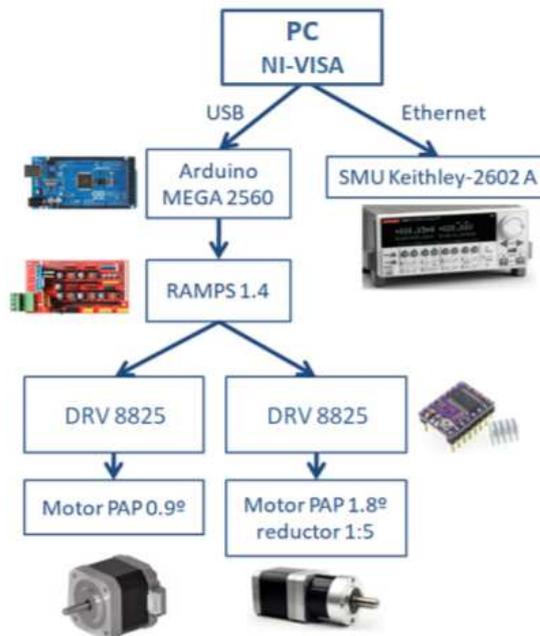


Figura 4: Esquema del hardware para controlar la base rotatoria y adquirir los datos.

El ensayo se llevó a cabo en un ambiente oscuro, con el simulador solar como única fuente de luz, para evitar que la luz parásita interviniera con la determinación precisa de la respuesta del sensor. Se midió la salida de cada sensor iluminado en condiciones de AM0 o AM1.5, dependiendo de la aplicación del sensor, ambas condiciones medidas con una celda de referencia de silicio. El equipo se programó para realizar una medición cada 5° entre 0 y 70° de elevación y cada 30° de rotación.

SENSORES CARACTERIZADOS

Sensor solar grueso para uso espacial

Los sensores solares gruesos (CSS, por sus siglas en inglés) son parte del control de actitud de un satélite o un cohete y se utilizan principalmente para la detección de la presencia y/o la orientación del Sol con relación al satélite. En el DES se diseñan y fabrican estos CSS para aplicaciones espaciales en base a los requerimientos de tamaño y de I_{cc} de las distintas misiones satelitales y se califican para vuelo realizándoles ensayos ambientales, de calificación y de aceptación. El elemento sensor es una celda solar de silicio monocristalino diseñada y elaborada en el DES y se le coloca en la superficie un vidrio protector (Bolzi et al., 2013). Hasta el momento los CSS de fabricación nacional se han empleado en las misiones espaciales SAC-A (Bolzi et al., 2002), Aquarius/SAC-D (Tamasi et al. 2009), el Proyecto VS-30, Amazonia-1, SAOCOM 1A y SAOCOM 1B (Martínez Bogado et al., 2015). El sensor caracterizado en este trabajo es el denominado CSS A-05, fue uno de los CSS de ingeniería de la misión SAOCOM, su formato es cuadrado de 12mm de lado y área activa circular de 50 mm², en la Figura 5 se puede observar el dispositivo montado en una base de aluminio.

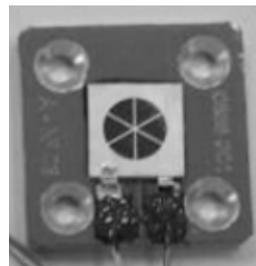


Figura 5: Sensor grueso de posición de ingeniería de la misión SAOCOM desarrollado en el DES.

Fotodiodo comercial

El sensor comercial SSFH 2430 es un fotodiodo de silicio con un FOV de 120° según lo especificado por el fabricante, el área activa del dispositivo presenta geometría cuadrada y tiene un área de 16 mm². Al sensor se le incorporó un vidrio protector para tener las mismas condiciones ópticas que el CSS de fabricación nacional. En la Figura 6 se muestra una imagen del sensor SSFH 2430.

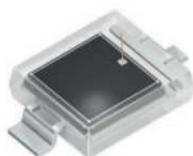


Figura 6: Sensor comercial SSFH 2430.

Radiómetro global desarrollado en el DES

Los radiómetros fotovoltaicos de bajo costo se desarrollan en CNEA desde el año 1998 (Bolzi, Tamasi et al., 2002) vienen utilizándose por distintos grupos de investigación, universidades, empresas y personas particulares. Este instrumento tiene como elemento sensor una celda fotovoltaica de silicio monocristalino diseñada y fabricada íntegramente en el DES con un área activa de 0,13cm². El instrumento consta de una base de aluminio, sobre la cual se monta el elemento sensor protegido por una cubierta de vidrio difusor sellado en su periferia, ver Figura 7. La cubierta de vidrio tiene dos finalidades, por un lado proteger al sensor fotovoltaico de las condiciones ambientales y por el otro, mejorar la respuesta angular debido al esmerilado superficial del mismo (Bolzi et al. 2008).



Figura 7: Radiómetro global desarrollado en el DES.

Radiómetro PAR desarrollado en el DES

La medición de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), definida por la fracción del espectro solar comprendida entre 400 y 700 nm, es necesaria en aplicaciones relacionadas con la fisiología de las plantas, modelos de productividad de cultivos, la producción de biomasa y la iluminación natural en invernaderos entre otras aplicaciones en el área agronómica (Tamasi y Martínez Bogado, 2013).

Los radiómetros PAR desarrollados en el DES tienen como elemento sensor una celda fotovoltaica de silicio de área activa circular, aprovechando la característica de las celdas fotovoltaicas de tener una respuesta espectral que depende de la longitud de onda incidente. Al elemento sensor se le adhirió un filtro comercial que permite medir solamente la región del espectro de interés.

Radiómetro PAR comercial

El elemento sensor de los radiómetros comerciales PAR Kipp & Zonen PQS-1 (ver Figura 8) es un fotodiodo, su FOV es de 180° y presenta un error direccional en elevación menor a 30 μmol/m²·s según la hoja de datos que proporciona el fabricante.



Figura 8: Radiómetro PAR Kipp & Zonen PQS 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización angular es un proceso repetitivo y puede implicar un largo período de medición, sobre todo si se desean realizar muchas mediciones en las mismas condiciones. Estas mediciones pueden ser para conocer la respuesta de una serie de dispositivos similares o para hacer una estadística de mediciones sucesivas de la respuesta de un mismo dispositivo. Hasta el momento en las condiciones en que se llevaba a cabo el ensayo, con una base mecánica y adquisición de los datos de forma manual, el tiempo que demandaba completarlo dependía de muchos factores; entre ellos la experiencia y práctica de los operadores, que son parámetros difíciles de definir. Con la modificación del equipo se descartaron las principales fuentes de error y de posibles demoras causadas por los factores humanos mencionados anteriormente.

Sensores espaciales

Luego de realizar las mediciones se analizaron los resultados mediante el cálculo del valor medio y la desviación estándar para cada ángulo de elevación debido a la variación del ángulo acimutal. Como se puede observar el gráfico de la Figura 9.a. la respuesta del sensor comercial presenta una mayor desviación que la del CSS elaborado en el DES, siendo la desviación del primero del orden de 10^{-3} y la del segundo del orden de 10^{-5} , esto se puede atribuir a la geometría cuadrada del área activa. De la gráfica de error relativo porcentual (Figura 9.b.) se puede observar que para los mayores ángulos de elevación el CSS tiene una excelente respuesta al coseno con un error relativo porcentual menor al 10%, mientras que el sensor comercial tiene un error relativo porcentual superior al 25%. El fabricante del sensor comercial define el FOV del sensor en $\pm 60^\circ$, lo cual se corrobora con las mediciones, en la figura 9.a. se observa que después de los 60° la respuesta del sensor comercial empeora de forma considerable.

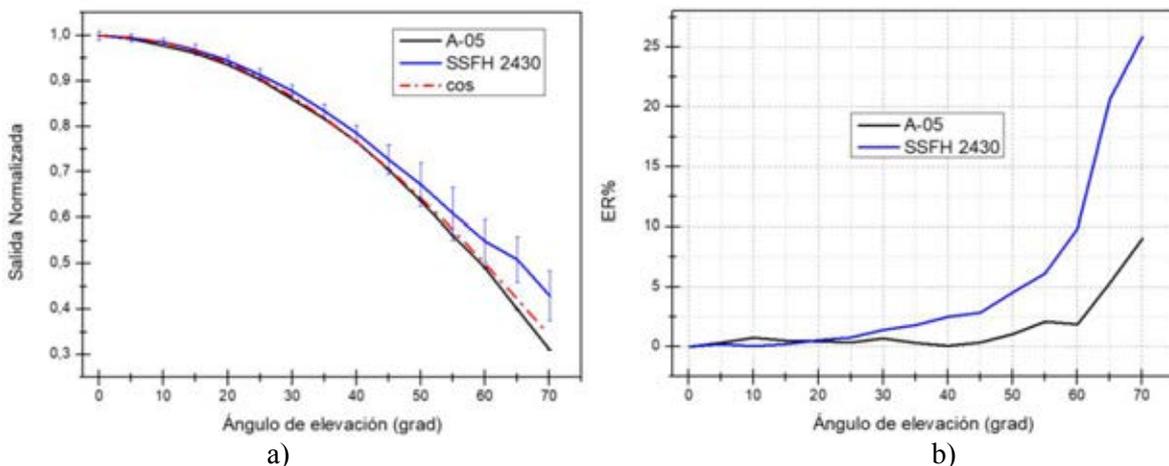


Figura 9: a) Respuesta angular del CSS A-05 elaborado en el DES y del fotodiodo comercial SSFH 2430 con vidrio b) Error relativo porcentual.

Sensores PAR

Como primera medida se midió la respuesta de un sensor global y uno PAR desarrollados en el DES y se compararon las mediciones para estudiar posibles diferencias en la salida de los sensores. Se observó que hay un mayor distanciamiento con la respuesta del coseno ideal en el radiómetro PAR (ver Figura 10) debido a la utilización del filtro óptico en la elaboración del sensor.

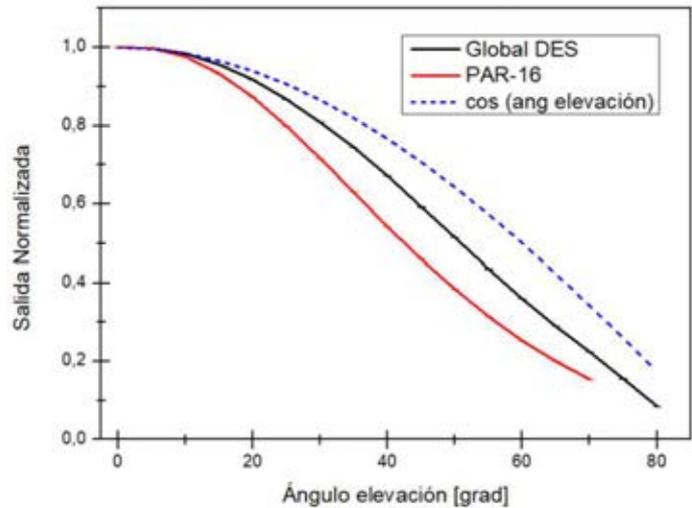


Figura 10: Resultados de las mediciones de los radiómetros PAR-16 y Global.

Luego se midieron cuatro sensores PAR desarrollados en el DES para analizar la repetitividad del proceso de elaboración de los dispositivos. La Figura 11 muestra las mediciones obtenidas y se puede observar un comportamiento similar en los cuatro radiómetros. Cada sensor se midió 10 veces para cada ángulo de elevación y se observó un desvío estándar experimental para el valor medio del orden de 10^{-5} . A partir de la medición de simetría de los radiómetros del DES se calculó un error direccional en acimut es del orden de 10^{-5} .

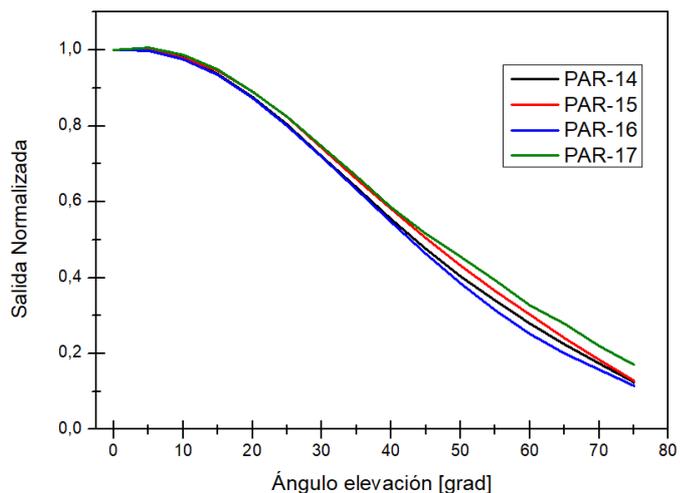


Figura 11: Resultados de las mediciones de respuesta angular normalizada de los radiómetros PAR-14, PAR-15, PAR-16 y PAR-17 desarrollados en el DES.

Se realizó la medición en respuesta angular de un radiómetro PAR comercial Kipp & Zonen PQS-1 con el objetivo de compararlo con los sensores PAR desarrollados en el DES. La Figura 12.a. muestra la respuesta del sensor PAR-16 junto con la del sensor comercial. Los resultados de la medición del sensor comercial Kipp & Zonen PQS-1 mostraron un comportamiento distinto a lo que indica el fabricante en la hoja de datos con respecto al error direccional del instrumento. Por otro lado se puede observar un mayor distanciamiento con la respuesta del coseno ideal para el radiómetro PAR-16. Luego de esta observación se decidió cambiar el difusor del radiómetro PAR-16 y se midió nuevamente su respuesta (Figura 12.a.). Se analizó el error relativo de los radiómetros con respecto a la respuesta ideal (Figura 12.b.) y se obtuvo que luego del cambio del difusor en el radiómetro PAR-16 el error relativo porcentual disminuyó a la mitad para los ángulos más elevados y se acercó a la respuesta del sensor comercial, lo que se considera como una mejora en la respuesta del radiómetro nacional.

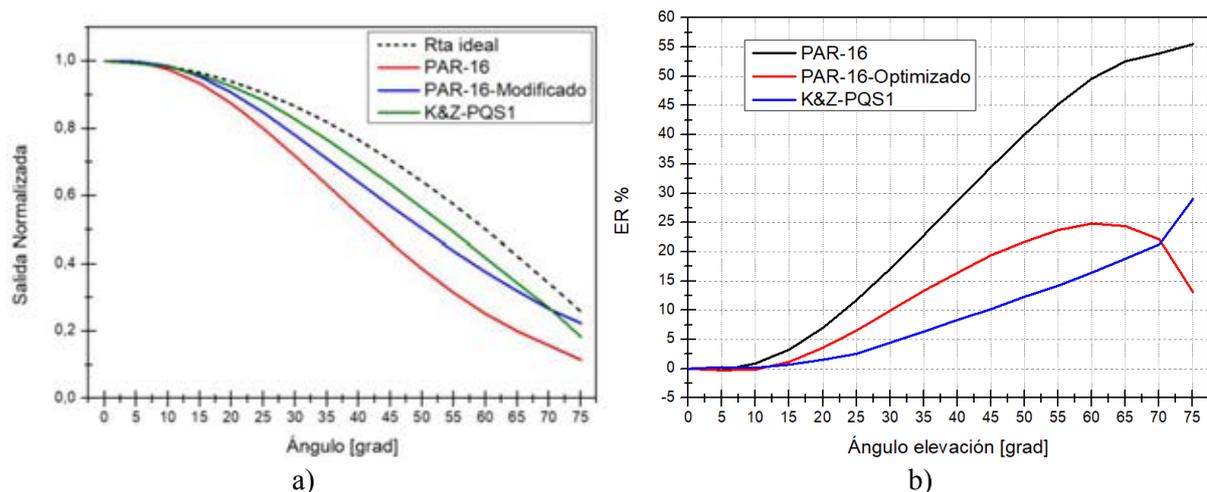


Figura 12: a) Comparación entre el sensor comercial de Kipp & Zonen PQS-1 con el sensor PAR-16 desarrollado en el DES, antes y después de optimizar el difusor. b) Error relativo porcentual para el radiómetro comercial Kipp & Zonen y el radiómetro PAR-16 desarrollado en el DES.

CONCLUSIONES

Se compararon las respuestas de los diferentes sensores elaborados en el DES con sensores comerciales de igual principio de funcionamiento y aplicaciones. Los dispositivos fueron ensayados en las mismas condiciones, disminuyendo de esta forma los errores que introducen la disposición experimental a la medición.

En base a las mediciones realizadas a los CSS se puede concluir que para los mayores ángulos de elevación el CSS desarrollado en el DES tiene una excelente respuesta al coseno con un error relativo porcentual menor al 10%, mientras que el sensor comercial tiene un error relativo porcentual superior al 25%. Se pudieron determinar parámetros de los sensores como, por ejemplo, el FOV, el error direccional en elevación y el error asociado a la variación de ángulo acimutal.

Se analizó la repetitividad de la respuesta entre varios sensores de radiación PAR de una misma serie de fabricación mostrando un comportamiento similar en todos ellos. Debido a estos resultados, en cuanto al apartamiento de la ley del coseno, se decidió modificar el difusor de uno de ellos y luego repetir el ensayo con lo cual se pudo verificar que el cambio del difusor mejoró la respuesta del sensor. A pesar de esta desviación, en Righini et al. (2009) y Denegri et al. (2009) se presentó la comparación entre las integrales diarias, horarias y cada diez minutos entre el sensor PAR de CNEA y el radiómetro PAR Kipp & Zonen mostrando una correlación excelente durante todo el período de 215 días que fuera analizado. La propia estabilidad del equipo Kipp & Zonen, cotejada mediante la comparación de las integrales diarias con un piranómetro CIMEL, permite equiparar el funcionamiento del sensor de CNEA con el sensor PAR comercial.

Como última observación, luego de realizar sucesivas mediciones con el equipamiento desarrollado en el DES, se observó que el tiempo empleado para llevar a cabo una caracterización angular completa disminuyó considerablemente (alrededor de un 80%) con respecto a los tiempos que se empleaban con las condiciones anteriores, principalmente gracias a la adquisición automática de los datos. Además, al variar el ángulo con los motores paso a paso de forma controlada se eliminaron los posibles errores debido al operador al cambiar el ángulo. Por otro lado, esto permite que para trabajos futuros se puedan hacer mediciones con variaciones más pequeñas en los ángulos de elevación y acimut, sin que esto requiera ningún esfuerzo extra del operador del ensayo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Agustín Dato por su colaboración en el diseño mecánico de la base rotatoria utilizada en este trabajo.

REFERENCIAS

- Bolzi, C. G., Bruno, C. J., Durán, J. C., Godfrin, E. M., Bogado, M. M., Merino, L. M., Tamasi M. et al. (2002). First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterization, and telemetry data analysis from SAC-A satellite. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 73(3), 269-280.
- Bolzi, C. G., Tamasi, M. J. L., Martínez Bogado, M. G., & Plá, J. C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6 (11.01).
- Bolzi, C. G., Martínez Bogado, M. G., Tamasi, M. J. L., Grossi Gallegos, H., Righini, R. (2008). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA. *Actas del IX Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica*.
- Bolzi, C. G., Martínez Bogado, M. G., & Tamasi, M. J. L. (2013). Reseña del desarrollo de sensores solares en CNEA para misiones satelitales. *Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 31, pp. 29 - 36
- Denegri, M. J. Righini R., Grossi Gallegos H., Bolzi C.G., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L., (2009). Estudio comparativo del comportamiento de un radiómetro PAR fabricado por CNEA con respecto a uno comercial. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 24(2).
- Grossi Gallegos, H. (2004). *Notas sobre radiación solar*. Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires.
- Manual ScienceTech Model SS1kW Solar Simulator User's Manual Version 2.2
- Martínez Bogado, M., Tamasi, M., Bolzi, C., & Raggio, D. (2015). Desarrollo de sensores solares en argentina, aplicaciones terrestres y espaciales. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 6(1).
- Moreno, A., Tamasi, M., Martínez Bogado, M., Díaz Salazar, M., & Kondratiuk, N. (2016). Comparación de la respuesta angular de un sensor grueso de posición para uso satelital con un sensor comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 20, pp 04.73-04.79.
- Righini, R., Grossi Gallegos, H., Bolzi, C. G., Martínez Bogado, M., & Tamasi, M. (2009). Comportamiento de un radiómetro PAR fabricado por CNEA respecto a un radiómetro PAR comercial KIPP & ZONEN. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 09-07.
- Tamasi, M. J. L., Bogado, M. M., Bolzi, C. G., Prario, I., & Alurralde, M. (2009). Sensores fotovoltaicos para la misión satelital AQUARIUS-SAC-D: desarrollo y ensayos ambientales. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, Vol. 23, pp. 19 - 26.
- Tamasi, M. J. L., Bogado, M. M. (2013). A theoretical approach to photosynthetically active radiation silicon sensor. *Thin Solid Films*, 534, 497-502.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to characterize the angular response of different photovoltaic devices by varying the angle of incident solar radiation. In order to achieve this, new automated angular response equipment made in the Department of Solar Energy (DES) of the National Atomic Energy Commission (CNEA) is being used. The characterization of solar sensors and photovoltaic radiometers developed in DES and commercial devices with similar characteristics is presented. The repetitiveness of the response between several photosynthetically active radiation sensors (PAR) of the same series of national manufacture was analyzed and the response of the different sensors developed in the DES with the response of commercial sensors of the same operating principle was compared. In the case of the national PAR sensors, the analysis of the results obtained led to a modification of the diffuser; the improvement in the response was checked by retesting the sensors.

Keywords: coarse sun sensor, PAR radiometer, global radiometer, angular response, solar energy.

NUEVO ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA: RESULTADOS PRELIMINARES

R. Aristegui, R. Righini, V. Stern, J. Lell, S. Bazán

GERSolar, INEDES-CONICET, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700)
Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. +54-2324-440241
gersolarunlu@yahoo.com.ar

Recibido 10/08/18, aceptado 19/09/18

RESUMEN: El Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján ha confeccionado un nuevo Atlas de Radiación Solar de la Pampa Húmeda Argentina, el cual incluye 12 cartas mensuales y una anual que dan cuenta de los niveles diarios medios de irradiación solar en plano horizontal a nivel de la superficie terrestre. La información ha sido obtenida a través de las estaciones que el GERSolar y el INTA operan en la llanura Pampeana y corresponde a más de siete años de mediciones realizadas con instrumental de primera calidad en diez sitios de la provincia de Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba y La Pampa. Se analiza la validez de la información presentada y se compara el potencial solar de la región con otros sitios de Argentina y el mundo.

Palabras clave: red de medición de radiación solar, Pampa Húmeda, mapas de radiación solar, aprovechamiento energético

INTRODUCCIÓN

El relevamiento de los niveles de radiación solar es ineludible para su aprovechamiento como fuente de energía. En efecto, el dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar, ya sea para la producción de electricidad, para distintas aplicaciones térmicas industriales, para el calentamiento de agua, el secado de productos vegetales o como fuente de información básica en los procesos biológicos y las aplicaciones agronómicas, solo puede ser realizado si se conocen los niveles de irradiación solar a nivel de superficie con el suficiente grado de representatividad. (Grossi Gallegos et al, 1983; Aristegui et al, 2012; Rooster et al, 2012).

Durante los últimos años han surgido en Argentina diversas iniciativas destinadas a evaluar el recurso solar en varios sitios del país. Así se han publicado Atlas provinciales, entre los que pueden mencionarse los de Jujuy (Franco, J. 2016), Mendoza (Cortellezi M et al., 2012) y Entre Ríos(falta referencia), entre otros sitios con alto potencial para el uso del recurso solar como fuente primaria de energía. Merece citarse, en ese contexto, el amplio trabajo, publicado en 2008, el cual incluye las cartas de radiación solar de Argentina (Grossi Gallegos, 1998, a y b; Grossi Gallegos et al, 2007), constituyendo hasta la fecha el relevamiento más exhaustivo realizado en el país. También Carmona et. al (2017) han evaluado el recurso solar en Argentina, estimando valores diarios medios mensuales por medio de imágenes satelitales.

No obstante, la naturaleza dinámica de los fenómenos climáticos, entre los que la radiación solar está incluida, y el empleo de estimaciones basadas en datos satelitales en el trazado de muchas de esas cartas, hacen necesaria la continuidad del trabajo con el fin de actualizarlas y validarlas con información terrestre actualizada. Para lograrlo es preciso efectuar mediciones de calidad, ubicando las estaciones de medición en sitios con la adecuada distribución geográfica, de manera que los datos obtenidos permitan evaluar la variabilidad espacial regional y alcancen el tiempo mínimo de medición que las series requieran según su variabilidad temporal. (Grossi Gallegos et al, 2017; OMM 1983, OMM 1989)

Esa conjunción de factores necesarios (calidad de las mediciones, adecuada distribución espacial, y suficiente longitud temporal de las series para que los valores sean representativos) han dado lugar a una serie de iniciativas, a menudo provinciales o regionales, con diversos grados de ejecución. También es necesario destacar que esos factores constituyen a su vez severos limitantes para iniciativas más ambiciosas, tales como la encarada por el programa ENARSOL destinado a evaluar las componentes global, directa y difusa de la radiación solar en todo el territorio nacional. (Aristegui et al, 2012).

La Pampa Húmeda Argentina presenta una serie de características propias que confieren particular interés al relevamiento del recurso solar en ella. Por un lado, se trata de una región de unos 600.000 km² que presenta la mayor población del país, inmersa en una zona de alta producción agropecuaria y que cuenta a su vez con una importante población dispersa, alejada de las redes públicas de transmisión de energía eléctrica. Estos hechos confieren una indudable importancia económica a la evaluación de los niveles de irradiación solar, con vista a responder a una serie de demandas energéticas que esa población presenta.

Por otro lado, la preponderancia de planicies en la zona asegura la posibilidad de cubrir su extenso territorio con un número relativamente pequeño de estaciones de medición estratégicamente distribuidas. Debido a esa baja variabilidad espacial la interpolación geoestadística de los datos permite obtener valores confiables en toda la zona.

En lo que respecta a la longitud de las series temporales de datos necesarios para determinar el recurso con valores medios mensuales que resulten representativos, la zona requiere un número de años de medición que se sitúa en la franja intermedia de los valores extremos que Argentina presenta. En tal sentido, se puede afirmar que las series de datos deben tener alrededor de diez años para que los valores medios mensuales representen los de la serie a largo plazo con un error menor al 5%, dentro de un intervalo de confianza del 90% (Righini et al, 2014).

La red de estaciones que el GERSolar opera junto con INTA (Convenio UNLu-INTA, 2015) cumple en la actualidad con los requisitos indispensables para trazar las cartas solares de la Pampa Húmeda: instrumental adecuado, distribución espacial apropiada, y el suficiente período de toma de datos.

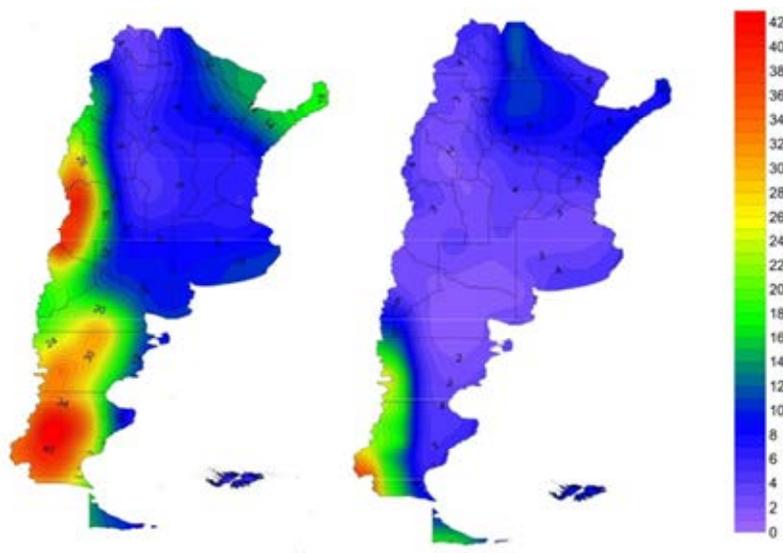


Figura 1: Años de medición necesarios para evaluar los valores diarios medios mensuales con error del 5% y nivel de confianza del 90%. Izquierda, Julio. Derecha: Enero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La red regional operada por el GERSolar e INTA consta de diez estaciones de medición instaladas en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y La Pampa, las que pueden verse en la Figura 2. Las estaciones cuentan con solarímetros de primera calidad (CMP11 y CM5 de

Kipp&Zonen; y 8-48 de Eppley), calibrados cada dos años, tal como fija la norma, en el Laboratorio de calibración del GERSolar (Righini et al, 2015) y adquisidores de datos Campbell CR1000 y CR800. Los solarímetros son interrogados por los adquisidores de datos una vez por segundo, almacenándose los valores integrados una vez por minuto. Los niveles de irradiación minutas son integrados para obtener los valores de irradiación (en MJ/m² o kWh/m²) horarios y diarios, y el promedio mensual de estos últimos se utiliza como base para el trazado de isolíneas de irradiación en la zona, empleando el método de interpolación kriging. Mensualmente esos mapas son presentados en la página web que el GERSolar administra en el sitio de la UNLu: <http://www.gersol.unlu.edu.ar/>. El período empleado para el trazado de las cartas se extiende entre 2010 y 2018, con datos de diez estaciones de medición de la radiación solar.

Las mediciones de la red Pampeana se han utilizado para evaluar valores medios estimados de irradiación solar global en Atlas en formato SIG de cobertura mundial o continental, los cuales se ofrecen con acceso libre a través de distintos sitios web (bases de datos generadas por el NREL, INPE y NASA, ninguna de las cuales incluye datos de tierra dentro del territorio argentino). (Raichijk et al, 2017). Dado el carácter estratégico del recurso solar y la información sobre su distribución y variabilidad, la medición y sostenimiento en el tiempo de una red de medición terrestre perteneciente a instituciones del estado (Universidad de Luján e INTA) cobra una importancia singular.

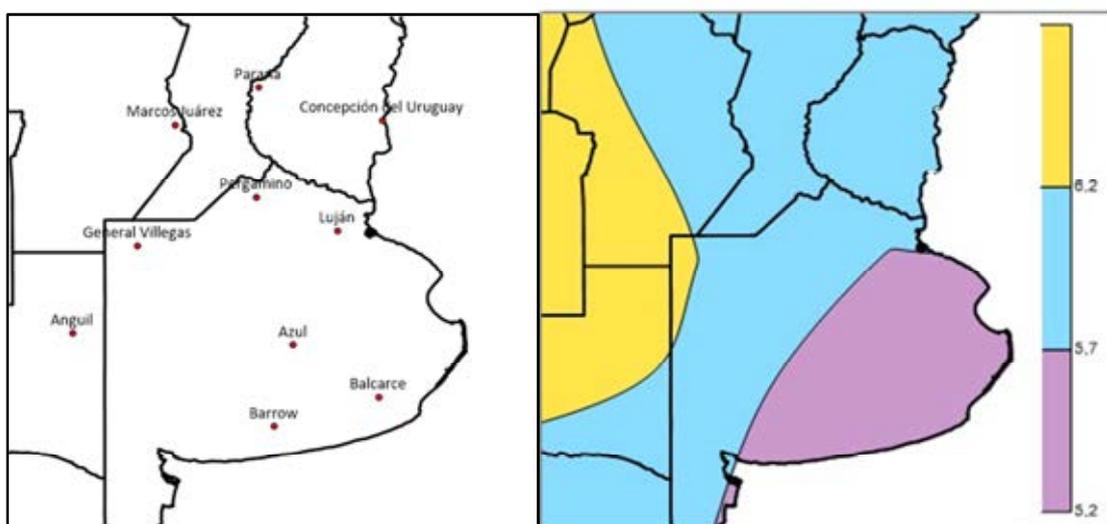


Figura 2: Izquierda: estaciones de medición de la red del GERSolar. Derecha: Mapa de irradiación solar diaria media mensual correspondiente al mes de marzo de 2018 (los valores están en kWh/m²).

La metodología empleada para el trazado de las presentes cartas ha sido discutida en un artículo anterior (Righini et al, 2017) y ha permitido elaborar doce cartas mensuales que representan la distribución espacial diaria media mensual de los valores de irradiación solar y una más con el valor de irradiación anual acumulado promedio.

Merece destacarse dentro de esta discusión la evaluación de los años de medición necesarios para la determinación del recurso. La cantidad de años requeridos ha sido establecida con la siguiente metodología:

Se usaron datos de radiación solar calculados por medio de imágenes satelitales a través de la aplicación del modelo SRB de Nasa sobre una serie de 23 años de estimaciones. Si bien las estimaciones satelitales pueden presentar desvíos respecto a los valores reales (Righini et al, 2016), las mismas fueron empleadas para determinar la variabilidad temporal del recurso, por lo cual el interés estaba centrado en dicha variabilidad, no en la representatividad de sus valores.

Considerando este hecho, se procedió de la siguiente manera:

- a) Se evaluó el valor medio de los datos del centro de cada celda y el desvío estándar alrededor de ese valor medio. Esto se hizo para cada uno de los meses y para el valor medio anual, procesándose para cada celda 23 valores correspondientes a cada mes y 23 valores medios anuales (período 1983-2005).
- b) Con los valores medios mensuales y el valor promedio se calculó la desviación estándar σ de cada celda para cada uno de los meses del año y para la media anual.
- c) Se seleccionó un nivel de incerteza determinado, denominado δ , al que a su vez se le asignaron distintos valores: 1,5%, 3%, 5% y 10%.
- d) El error absoluto admitido para cada mes se determinó como la media mensual del período de la serie multiplicado por δ . Se le llamó ε a este producto. Este procedimiento se aparta del empleado por Grossi Gallegos, juzgándose más apropiado evaluar los errores mensuales en función de los valores medios mensuales correspondientes a cada mes. Emplear, tal como lo hiciera Grossi Gallegos, el valor máximo medido puede dar lugar a subestimar el número de años de medición necesarios durante los meses de invierno (que presentan los menores valores de radiación) y sobreestimarlos en los meses de mayor radiación.
- e) En base a la desigualdad de Tschebichev se determinó el número n de años de medición necesarios como

$n \geq \left(\frac{z(p) \cdot \sigma}{\varepsilon} \right)^2$, donde $Z(p)$ es el valor de la distribución de probabilidad t de Student con $n-1$ grados de libertad, que establece en $1-p$ la probabilidad porcentual de que el valor de la media real se encuentre dentro del intervalo de confianza $\bar{x} - Z(p) \cdot \sigma$; $\bar{x} + Z(p) \cdot \sigma$ con una media muestral \bar{x} calculada en n años.

- f) Con los n así obtenidos para cada valor de δ y p seleccionados se interpolaron los valores de cada celda usando kriging, representándose espacialmente en un mapa de Argentina los valores de las isolíneas correspondientes.

Esa metodología aseguró que, para la mayoría de los meses, los años de medición existentes en los sitios de la red (Tabla 1) son suficientes para evaluar el recurso solar con el nivel de incerteza explicitado. La excepción la constituyen los de marzo, abril y junio, para los cuales, en el peor de los casos, son necesarios entre diez y quince años de medición. Este hecho confiere el carácter de preliminar a las presentes cartas.

Estación	Longitud	Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Anguil	-63,99	-36,54	148	85	140	150	93	140	186	154	164	186	148	147
Azul	-59,88	-36,77	62	70	93	90	93	90	124	93	100	69	54	62
Bakcarce	-58,30	-37,76	185	140	186	150	186	120	124	124	180	216	150	173
Barrow	-60,24	-38,32	155	141	155	150	155	180	186	139	150	155	150	155
C. del Uruguay	-58,35	-32,49	185	141	155	150	186	180	186	155	175	186	180	178
Gral. Villegas	-62,78	-34,87	155	169	184	150	185	179	185	186	179	186	180	186
Luján	-59,06	-34,59	243	220	243	240	248	239	217	208	239	248	237	248
Marcos Juárez	-62,08	-32,57	186	191	217	210	240	210	217	152	150	155	150	125
Paraná	-60,54	-31,85	217	140	135	120	155	180	186	186	210	217	210	217
Pergamino	-60,57	-33,94	143	124	155	210	154	240	248	186	205	216	131	179

Tabla 1: Cantidad de días medidos dentro de cada mes, por estación.

Los valores medios mensuales han sido calculados promediando sobre todos los días del mes disponibles. Si bien las series de datos tienen días faltantes en prácticamente todas las estaciones, se considera que:

- a) los promedios así calculados difieren en un valor menor al error instrumental que los obtenidos promediando las medias de todos los meses.
- b) de haber considerado sólo los meses con un número de días faltantes menores que 3 (Grossi Gallegos et al, 2017), los datos disponibles hubiesen sido sensiblemente menos que los analizados.

Un análisis de la influencia de los días faltantes en los valores medios mensuales se encuentra en proceso de elaboración, lo que permitirá arribar a conclusiones precisas sobre el tratamiento de los datos en las futuras versiones del Atlas de la Pampa Húmeda Argentina.

RESULTADOS

En la siguiente página (Figura 3) se muestran dos cartas de irradiación diaria media mensual para la zona correspondiente a la Pampa Húmeda Argentina. Las magnitudes corresponden a kWh/m^2 . Los valores asignados representan los valores medios a largo plazo con una incerteza del 5% dentro de un nivel de confianza del 90%, salvo para los meses de marzo, abril y junio, para los cuales el intervalo de confianza es menor al 90%.

Debido a que la radiación fotosintéticamente activa (PAR) es un porcentaje casi fijo del valor de radiación solar global, las cartas obtenidas pueden usarse a su vez para representar cartas de PAR (Figura 4). Esa banda espectral resulta de relevancia en los campos agronómico y biológico, por lo cual las cartas de radiación global constituirían un aporte destinado a cubrir un faltante de información en estas áreas de particular interés. Para lograr esto simplemente puede evaluarse la radiación PAR como el 44% de la radiación solar diaria media mensual (Denegri, 2011, Raichijk, 2011.) Este factor brinda valores aceptables de radiación fotosintéticamente activa con diversos niveles de cobertura de cielo.

Potencial fotovoltaico de la Pampa Húmeda Argentina

Al tiempo que las cartas de irradiación presentadas aportan información a una serie de herramientas que optimizan el aprovechamiento energético de la energía solar (discos de irradiación solar, (Wallace, 2017), cálculo de ángulos de inclinación óptimos para la captación de energía, entre otros) el atlas muestra una realidad poco tenida en cuenta: la Pampa Húmeda presenta valores de irradiación que la transforman en una zona con un gran potencial de desarrollo de sistemas de aprovechamiento energético, en particular de generación fotovoltaica.

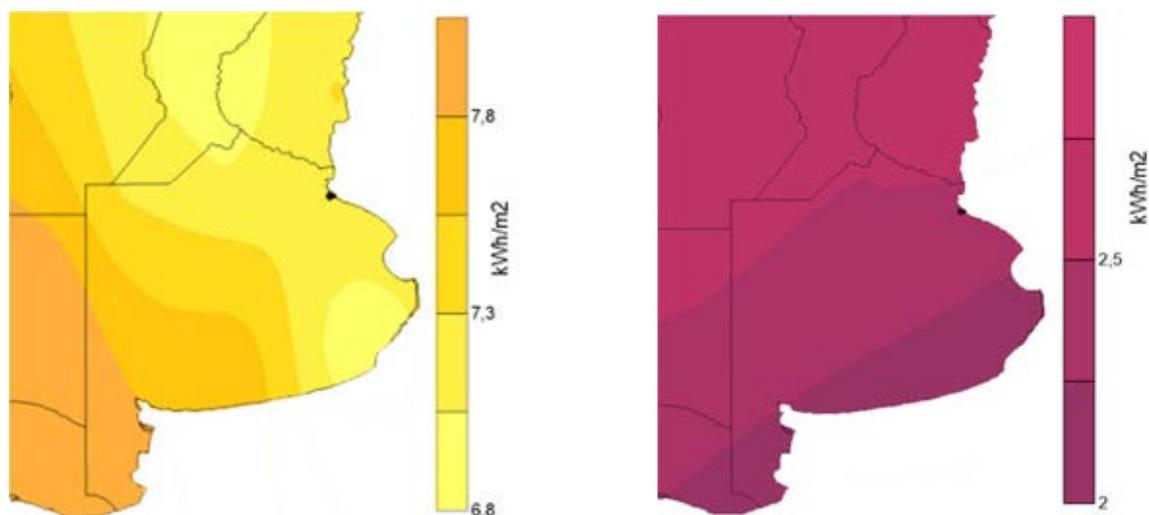


Figura 3: Cartas de irradiación solar diaria media mensual de la Pampa Húmeda Argentina correspondientes a los meses de enero (derecha) y julio (izquierda). Los valores están en kWh/m^2 .

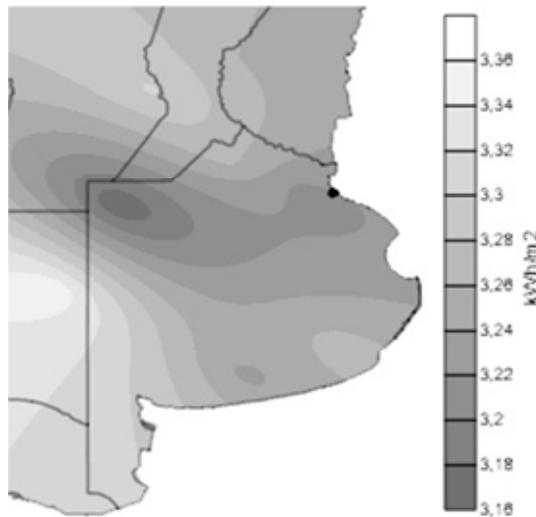


Figura 4: Radiación fotosintéticamente activa correspondiente al mes de enero de 2018. Los valores están en kWh/m²

En efecto, tal cual muestra la Figura 5, dicha zona presenta valores de irradiación comparables a los de España (una de las mejores zonas de Europa en términos de irradiación solar, <https://www.panelessolaresbarcelona.com/mapa-de-la-radiacion-solar-en-europa>), si bien es cierto que en Argentina existen zonas con valores mucho más elevados de irradiación solar (entre los mejores del mundo).

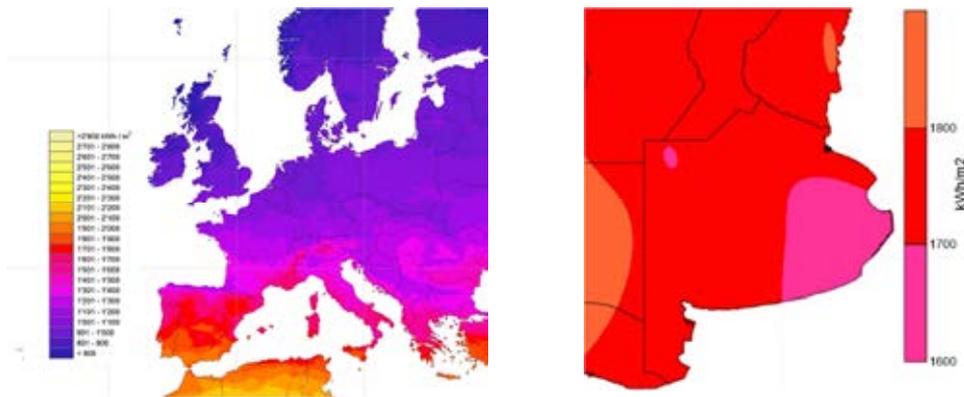


Figura 5: Mapa de energía anual colectada promedio. A la izquierda: Europa. A la derecha, Pampa Húmeda. Valores en kWh/m².

Análisis de días cobertura de cielo

Del análisis de los datos recolectados en las estaciones que constituyen la red solarimétrica pampeana, se puede obtener una estadística sobre la cobertura nubosa en la zona. Considerando las siguientes categorías: cielo cubierto: $kt < 0,3$; cielo parcialmente cubierto con dominancia de difusa: $0,3 < kt < 0,55$; cielo parcialmente cubierto con dominancia de directa: $0,55 < kt < 0,7$; cielo despejado: $0,7 < kt$, puede concluirse que el porcentaje de días cubiertos, parcialmente cubiertos y nublados permanece prácticamente constante en toda la zona considerada. Otro parámetro de importancia surgirá en el futuro inmediato del análisis de días cubiertos consecutivos, dato muy relevante para el dimensionamiento de los dispositivos de acumulación en sistemas fotovoltaicos aislados. En la Figura 6 se muestran los porcentajes de kt diarios para la base completa. La zona tiene una alta ocurrencia de

días despejados y parcialmente cubiertos con dominancia de directa, alcanzando entre ambos, a nivel anual, un promedio del 60% de los días.

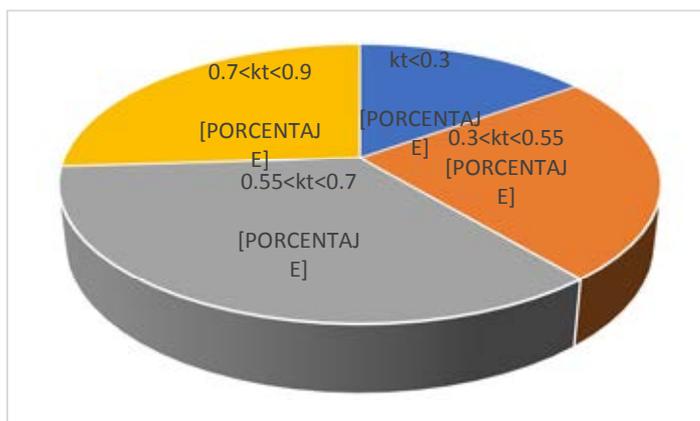


Figura 6: Porcentaje promedio de índice de claridad en la Pampa Húmeda.

CONCLUSIONES

El Atlas de irradiación solar de la Pampa Húmeda Argentina representa un importante avance en lo que hace a la actualización de la información sobre los niveles de irradiación solar de la región. El Atlas presenta un buen acuerdo con el trabajo presentado por Carmona et al. (2017), pero a diferencia de éste no se trata de una estimación sino que se basa en mediciones de los niveles de irradiación solar durante un número de años que permite evaluar el recurso solar con un aceptable nivel de confianza.

La Pampa Húmeda es una zona de gran desarrollo económico, donde reside la mayor cantidad de habitantes de Argentina, con una importante población dispersa alejada de las redes públicas de distribución de energía y en un contexto local y regional de incremento de la oferta de energía fotovoltaica, contar con este tipo de información resulta relevante. Los emprendimientos energéticos, agropecuarios y científicos que la utilicen contarán con datos actualizados obtenidos con instrumental de primera calidad, debidamente calibrado y con el suficiente peso estadístico como para asegurar la representatividad de los valores medios.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a Andrés Domenech, técnico del GERSolar y a los observadores de las EEA del INTA encargados de las estaciones solarimétricas.

ABSTRACT

The Solar Radiation Studies Group (GERSolar) of the National University of Luján has created a new Atlas of Solar Radiation of the Pampas Húmeda Argentina, which includes 12 monthly letters and an annual one that offers the account of the new means of communication solar irradiation in a horizontal plane at the level of the earth's surface. The information has been obtained through the stations that the GERSolar and the INTA operates in the Pampeana plain and the correspondence to more than seven years of measurements made with first quality instruments in ten sites in the province of Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba and La Pampa. The validity of the information presented is analyzed and the solar potential of the region is compared with other sites in Argentina and the world.

KEYWORDS

Solar radiation measurement network, Pampa Húmeda, solar radiation maps, energy use

BIBLIOGRAFÍA

- Grossi Gallegos, H., Nollmann, I., Lopardo, R. y Atienza, G. (1983). Evaluación preliminar del recurso solar en Argentina. En Actas de la 8a. Reunión de Trabajo de la ASADES, Santa Rosa, Argentina, pp. 179-194.
- Aristegui, R. y Righini R. (2012). Discusión sobre el proceso de selección de sitios apropiados para la ubicación de estaciones de una futura red solarimétrica nacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184) vol. 16, pp. 11.39-11.46.
- Rooster, R. y Abdulha, A. (2012). On the growing importance of solar energy in the world: a new horizon. *Internatonal Solar Energy Magazine*, Vol 8. 245, p. 124-131.
- Franco, J. Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Jujuy. Comunicación. Jornada Nacional de Energía Solar Aplicada, San Salvador de Jujuy, septiembre de 2016.
- Cortellezzi M y Kaake N. Atlas de la energía de Mendoza. 54 pp. Usillal Ediciones, 2012.
- Aristegui, R. Righini, R. Discusión sobre el proceso de selección de sitios apropiados para la ubicación de estaciones de una futura red solarimétrica nacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184), vol. 16, pp. 11.39-11.46 (2012).
- Grossi Gallegos H., Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, pp.119-123 (1998).
- Grossi Gallegos H., Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, pp. 33-42 (1998).
- Grossi Gallegos H. y Righini R. 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 páginas + 1 CD-ROM, mayo de 2007 (ISBN 978-987-9285-36-7), Registro de la Propiedad Intelectual No. 554247 del 15 de marzo de 2007.
- Carmona F., Orte, F., Rivas, R. Wolfram E. y Kruse E. Development and Analysis of a New Solar Radiation Atlas for Argentina from Ground-Based Measurements and CERES_SYN1deg data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Noviembre de 2017. Grossi Gallegos, H, Coquet E. La pérdida de datos diarios de irradiación solar global y una evaluación sobre su influencia en los promedios mensuales. *Revista de Climatología*, Vol17, 45-47 (2017).
- Organización Meteorológica Mundial (1983): Guía de prácticas climatológicas (2a edición), OMM, Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial (1989): Cálculo de las normales estándar mensuales y anuales de 30 años: preparado por una reunión de expertos, Washington D.C.,EE.UU., marzo de1989.WCDPNo. 10, OMM, Ginebra.
- R. Righini, R. Aristegui, A. Roldán. Determinación de la cantidad de años de medición necesarios para la evaluación de la radiación solar global a nivel de superficie en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184) vol. 2, 2014, pp. 1117-1125.
- Convenio UNLu-INTA. El GERSolar (por parte de la UNLu) y el INTA firmaron un convenio específico de cooperación destinado a mantener la red pampeana de medición de la radiación solar, con vigencia 2015-2019.
- R. Righini y R. Aristegui, Caracterización del nuevo laboratorio de medición del GERSolar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184) Vol. 3, pp. 11.01-11.09, 2015.

- C. Raichijk y F. Taddei, Atlas globales de radiación solar: Evaluación en la Pampa Húmeda Argentina, Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ISBN 978-987-29873-0-5). Vol. 5, pp. 11.79-11.86, 2017.
- R. Righini y R. Aristegui (2016) Plantas fotovoltaicas: perjuicios por no evaluar convenientemente el recurso solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISBN 978-987-29873-0-5, pp 08.69-08.76.
- R. Righini y R. Aristegui. Metodología para el trazado de cartas solares de la Pampa Húmeda Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) Vol. 4, pp. 11.105-11.112, 2017.
- Denegri, M. J, Relación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en Luján, Buenos Aires, Argentina. XIV Congreso Latino-e Ibérico de Meteorología, Setúbal, Portugal, 258-263. (2011)
- C. Raichijk, Estudio de las fracciones solar UV, PAR e IR en Luján, Provincia de Buenos Aires. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) vol. 5, 2011, pp. 1187-1194.
- C. Wallace. 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. Tesis de maestría en energías renovables, mención solar, UTN, Córdoba, 2017.

SOBRE LA COMPLETITUD DE LAS SERIES TEMPORALES DE DATOS DE IRRADIACIÓN SOLAR EN LUJÁN, PROVINCIA DE Bs. As.

Sergio Luza Regueiro, Raúl Righini, Sebastián Bazán, Adrián J. Roldán.

GERSolar, INEDES-CONICET, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. +54-2324-440241- gersolar@yahoo.com.ar

Recibido 10/08/18, aceptado 21/09/18

RESUMEN El interés creciente en el conocimiento de los niveles de radiación solar con vistas a su aplicación como fuente primaria de energía presenta el inconveniente, muchas veces, de la insuficiencia de datos medidos a nivel de superficie, muchas veces por incompletitud de las series. El presente artículo retoma ese tema, analizando exhaustivamente la consecuencia de la falta de datos diarios en los valores medios diarios mensuales en la estación de medición de la radiación solar que el GERSolar tiene en Luján, extrapolando las conclusiones extraídas a la red pampeana de medición.

Palabras clave: Radiación solar, completitud de series, promedios diarios mensuales

INTRODUCCIÓN

Los datos sobre los niveles de radiación solar en la superficie terrestre, en plano horizontal, resultan, siempre, relevantes. No solo permiten evaluar la distribución espacio temporal del recurso solar, sino que constituyen la herramienta básica sobre la cual proyectar su uso eficiente como fuente energética. El diseño y dimensionamiento de las plantas de generación eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos o sistemas térmicos, el calentamiento de agua a través de colectores solares, entre otros usos energéticos, requiere conocer los niveles medios mensuales de irradiación solar. También resultan importantes porque son datos de interés climatológico y biológico, sumándose a ese hecho el uso que de ellos hace la agroindustria.

Pero, tal como se señalara en trabajos anteriores (Grossi Gallegos et al., 2016-2017, Grossi Gallegos 1998 a) y b), la radiación solar debe ser medida durante muchos años para que los valores diarios medios mensuales resulten estadísticamente representativos .

La cantidad de años necesarios para que esos valores medios representen la media dentro de un intervalo de confianza preestablecido con un error determinado, depende de la variabilidad temporal de los niveles de radiación solar, oscilando entre unos 5 años en los sitios de menor variabilidad a una cantidad superior a los 20 años, en ubicaciones donde el recurso es más variable.

Existen en la actualidad muchas iniciativas destinadas a medir la radiación solar en plano horizontal a nivel de la superficie terrestre. Algunas de ellas tienen una extensa historia (como la del servicio meteorológico nacional) y pretenden cubrir extensas zonas del territorio argentino; otras son más recientes y su cobertura es claramente regional o local (tales como las asociadas a las instalaciones de plantas fotovoltaicas). Pero en todas ellas, inevitablemente, se registran pérdidas de datos. Esas pérdidas son inherentes a fallas en los adquirentes de datos, en la comunicación entre las estaciones de medición y los sistemas de procesamiento de la información, o en deficiencias de los propios sensores de medición de la radiación solar.

¿Cuántos datos pueden faltar sin afectar significativamente los valores medios? ¿Qué error supone calcular los promedios mensuales con datos faltantes?

Ése es el tipo de preguntas que se presentan a aquellos que trabajen con series de datos de radiación solar y acercar una posible respuesta es el objetivo del presente trabajo.

MATERIALES Y MÉTODO

Se trabajó con datos de medición proveniente de una de las diez estaciones pertenecientes a la red pampeana que el GERSolar administra juntamente con INTA: la estación Luján. Luján, al igual que el resto de las estaciones registra datos minutales de energía solar incidente en plano horizontal desde hace más de siete años, con un piranómetro CMP11. En el resto de los sitios de medición el equipamiento usado son piranómetros Eppley CM180, y CM5 y CMP11, de la firma Kipp&Zonen, calibrados regularmente en el laboratorio de calibración del GERSolar. La red de estaciones se muestra en la figura 1.

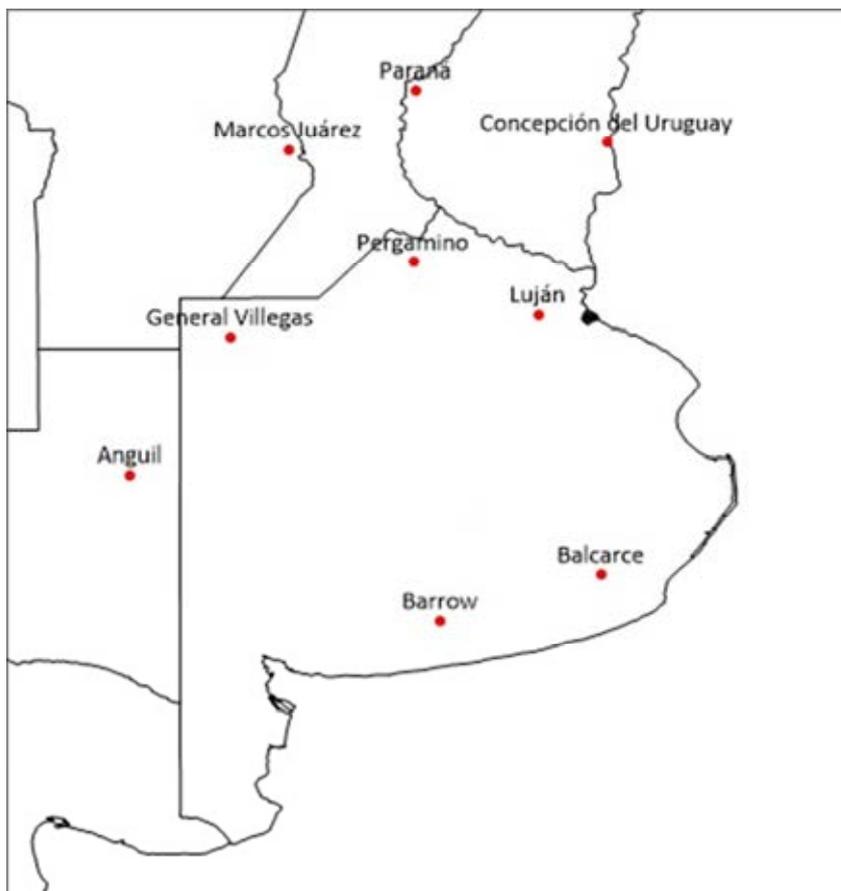


Figura 1: Red de estaciones del GERSolar-INTA

Para evaluar la influencia de la pérdida de datos se realizó el siguiente procedimiento:

Se sacaron una serie de días (desde uno hasta siete) en cada uno de los meses de la serie completa de datos disponible de cada una de las estaciones. Esos días fueron extraídos cubriendo todas las combinaciones posibles de extracción de esa cantidad de días dentro de cada uno de los meses analizados. También se extrajeron datos al azar, entre 1 y 7 días, de las series de datos. Para cada una de las extracciones se calculó el promedio mensual con los días restantes y se comparó ese promedio con el promedio real (sin extracción alguna). Este procedimiento difiere del empleado por Grossi Gallegos (Grossi Gallegos et al, 2016-2017) en lo siguiente: el trabajo citado se basó en la extracción de días consecutivos de datos (entre dos y diez) y en la extracción al azar de la misma cantidad de días. El trabajo presente, además de las extracciones al azar, analiza **todas** las posibles combinaciones posibles entre uno y siete días, en los meses analizados.

El valor absoluto de la diferencia porcentual (relativa al promedio sin extracción) de los promedios sin extracción y los promedios con extracción se denominó desvío, y fue calculado para cada uno de las extracciones realizadas en cada uno de los meses de datos disponibles en la estación Luján. Se analizaron, siete años de datos.

Los desvíos, así obtenidos, permitieron evaluar exhaustivamente las consecuencias que la pérdida de datos de una serie trae aparejada en lo que hace al cálculo de los valores diarios medios mensuales.

Si bien no se analizaron aún los datos provenientes del resto de la red de medición pampeana, la homogeneidad del territorio en lo que hace a la distribución del recurso solar y la similar variabilidad de los niveles de irradiación solar diaria media mensual (definida como el cociente entre el desvío estándar y el valor medio) hace presuponer con buenos fundamentos, que los resultados serán extrapolables al resto de la red. No obstante, en el futuro inmediato este trabajo será repetido para la serie de datos disponibles en cada una de las estaciones de la red.

RESULTADOS

A continuación, en las tablas siguientes, se muestran valores promedios de los desvíos, extrayendo sistemáticamente entre 1 y 7 días de cada mes. Además, se presentan los desvíos máximos alcanzados y la probabilidad máxima de que el desvío sea mayor a 5%, en función de los días extraídos. Se grafican los desvíos en función de la variabilidad media mensual.

Días extraídos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0,8	0,8	0,8	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,3	1,1	0,9	0,7
2	1,2	1,2	1,2	1,5	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,4	1,0
3	1,4	1,5	1,5	1,9	2,1	2,2	2,2	2,3	2,2	1,9	1,7	1,3
4	1,7	1,8	1,7	2,2	2,4	2,6	2,5	2,7	2,6	2,2	2,0	1,5
5	1,9	2,1	1,9	2,5	2,7	2,9	2,9	3,0	2,9	2,5	2,3	1,7
6	2,1	2,3	2,1	2,8	3,1	3,3	3,2	3,4	3,2	2,8	2,5	1,9
7	2,3	2,6	2,4	3,1	3,4	3,6	3,6	3,7	3,6	3,1	2,8	2,1

Tabla N°1. Desvíos medios porcentuales para cada uno de los meses del año, extrayendo todas las combinaciones posibles de 1 a 7 días en el mes para la estación Luján.

Días extraídos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	3,1	3,4	3,0	3,2	3,1	3,1	3,1	4,5	3,4	3,2	3,2	3,2
2	6,1	6,6	5,8	6,6	6,1	6,3	6,4	9,2	6,7	6,4	6,3	6,5
3	8,7	10,0	8,4	10,0	9,2	9,9	9,8	13,6	10,1	9,8	9,3	9,6
4	12,1	11,6	10,1	12,6	11,9	13,0	13,2	18,0	13,7	12,6	12,3	11,2
5	14,8	13,2	12,0	15,5	14,7	16,2	16,6	22,0	17,4	15,4	15,3	12,8
6	17,0	14,9	13,7	18,3	17,7	19,3	20,1	26,3	20,6	18,0	17,9	13,6
7	18,1	16,4	15,4	20,8	21,0	22,2	23,7	30,4	24,0	20,6	20,4	14,4

Tabla N°2. Desvíos máximos porcentuales para cada uno de los meses del año, extrayendo todas las combinaciones posibles de 1 a 7 días en el mes para la estación Luján.

Días extraídos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,4	0,9	0,5	2,5	2,1	3,0	14,7	14,7	4,3	2,3	2,2	0,7
3	2,9	2,9	1,4	10,5	8,8	14,5	20,3	20,3	11,9	10,4	3,5	2,1
4	3,9	6,2	3,1	16,7	18,6	19,8	28,7	28,7	19,6	17,0	6,1	3,7
5	6,7	10,6	6,5	22,8	22,5	26,6	34,5	34,5	25,5	22,9	16,1	5,2
6	13,4	15,2	10,1	28,2	28,2	31,8	39,6	39,6	30,9	28,2	20,7	7,7
7	19,7	20,4	14,0	32,9	33,0	36,6	44,2	44,2	35,7	32,9	23,6	11,3

Tabla N°3. Probabilidad máxima porcentual de que el desvío sea mayor a 5%, extrayendo todas las combinaciones posibles de 1 a 7 días en el mes para la estación Luján.

Tal como era de esperar, y como mostrara Hugo Grossi Gallegos en su artículo (Grossi Gallegos et al, 2017), el desvío depende, además del número de días extraídos, de la variabilidad media mensual. En aquellos sitios y durante los meses en los que la variabilidad del recurso solar sea baja, los valores medios calculados con un número de días menores a los del mes, no difieren mucho de los valores medios reales. Es la variabilidad del recurso la que determina cuántos días pueden perderse durante un mes sin que el cálculo de la media mensual se vea sensiblemente afectado.



Figura 2: Variabilidad media mensual de la radiación solar para la Estación Luján.

A medida que el número de días faltantes aumenta, los desvíos aumentan. Es notable como, en promedio, esos desvíos nunca superan el 4% para días faltantes entre 1 y 7. Es decir que, en promedio, pueden faltar siete días de datos en un mes sin que el valor medio calculado difiera del real en más del 4%. Considerando que en muchos sitios de la red el instrumental usado presenta un error relativo que ronda ese valor, consideramos que ésta es un dato a tener en cuenta.

En la figura siguiente se muestran los desvíos medios, máximos y la probabilidad de desvíos mayor al 5% en función de los días extraídos del cálculo de los valores medios para dos casos extremos: enero y agosto.

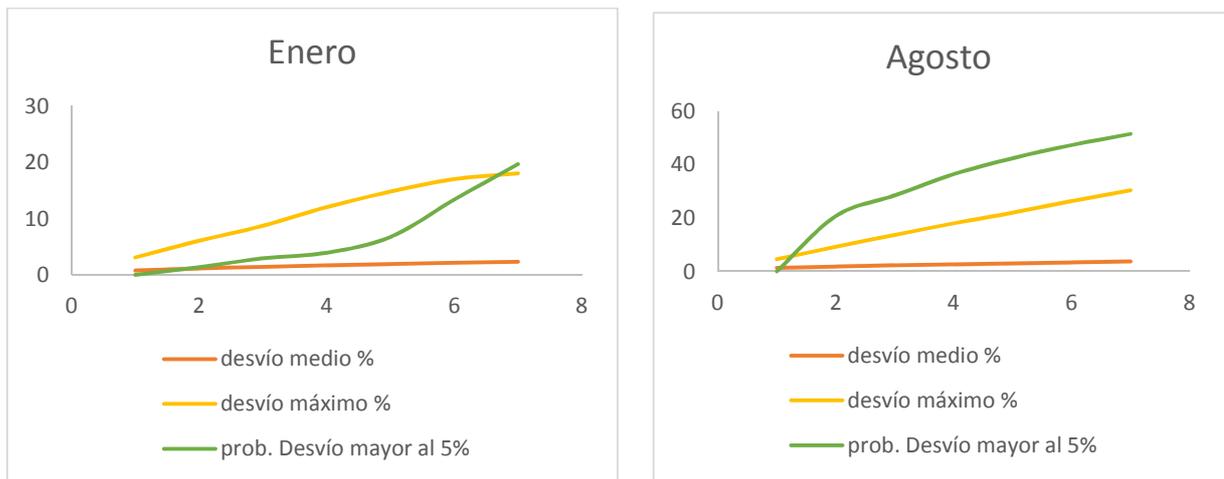


Figura 3: Desvíos porcentuales (medios mensuales y máximos) y probabilidad porcentual de desvío mayor al 5% en función de la cantidad de días extraídos para los meses de enero (izquierda) y (agosto) derecha.

Es verdad que los desvíos máximos pueden ser mucho más elevados que el 4%, a medida que el número de días faltantes aumenta (un máximo de 44% para 7 días faltantes en durante los meses de julio y agosto). En ese caso, el desvío es claramente inaceptable. Pero resulta notable ver cómo, durante los meses de mayor radiación en la zona, esos desvíos máximos son sensiblemente menores. Ése hecho debe formar parte de un análisis ponderado al momento de descartar información mensual ante el faltante de días, pudiendo establecerse una norma que considere la variabilidad media mensual como otro parámetro a considerar.

Por otra parte, el análisis probabilístico muestra que, en el peor de los casos, la probabilidad máxima de cometer un error superior al descartar 7 días de datos para el cálculo de los promedios mensuales es inferior al 30% y ello sólo ocurre para el mes de agosto. Para el resto de los meses, hacer el cálculo de los promedios mensuales sin contar con datos entre 1 y 7 días, supone en promedio errores aceptables, resultando la probabilidad de cometer errores que superen el 5% menor al 25% en prácticamente todos los meses.

CONCLUSIONES

El análisis exhaustivo del cálculo de los valores diarios medios mensuales en la estación Luján, para meses que tengan faltantes entre 1 y 7 días de datos, revela que, en promedio, dichos valores medios diferirán de los reales en menos del 4%, lo cual resulta aceptable para una red de medición con equipos que presenten ese nivel de incerteza en los valores medidos de irradiación solar.

Los resultados muestran desvíos máximos que crecen con el número de días faltantes, y que pueden resultar inaceptables en muchos casos. En todos los casos, la variabilidad mensual de los niveles de irradiación solar es quien determina la sensibilidad de los desvíos ante el faltante de datos.

No obstante, es de señalar que la probabilidad de cometer errores mayores al 5% resulta, en general, menor al 25% en casi todos los casos, aun faltando 7 días de datos en el cálculo de los valores medios.

Éste hecho, según nuestra opinión, resulta significativo en la decisión de descartar información de meses enteros en las redes de medición por ausencia de datos diarios.

Si bien el análisis hecho en la estación Luján se ampliará al resto de las estaciones de la red pampeana, la similar variabilidad media mensual que el recurso solar presenta en la zona hace suponer que las conclusiones obtenidas aquí son extrapolables a la Pampa Húmeda Argentina.

Agradecimientos: Los autores expresan su agradecimiento al Sr. Andrés Domenech, por su asistencia técnica en el funcionamiento de la estación Luján y al personal del Inta que coordina y atiende juntamente con el GERSolar la red pampeana de medición.

ABSTRACT The increasing interest in the knowledge of the levels of solar radiation with a view to its application as a primary source of energy, presents the drawback, many times, of the insufficiency of data measured at the surface level, often due to incompleteness of the series. This article returns to this topic, exhaustively analyzing the consequence of the lack of daily data in the monthly average values in the solar radiation measurement station that the GERSolar has in Luján, extrapolating the extracted conclusions to the Pampa network of measurement.

Keywords: Solar radiation, Radiación solar, data completeness, monthly daily averages.

REFERENCIAS

- Grossi Gallegos H, Coquet E. La pérdida de datos diarios de irradiación solar global y una evaluación sobre su influencia en los promedios mensuales. *Revista de Climatología*. Vol. 17, pp. 45-57 (2017)
- Grossi Gallegos H, Coquet E. Influencia de la pérdida de datos sobre los promedios de irradiación solar global. *Revista Averma*, Vol. 4, pp. 11.53-11.61 (2016)
- Grossi Gallegos, H. Distribución de la radiación solar global en la República Argentina II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5:33-42. (1998 a)
- Grossi Gallegos, H. Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4:19-123. (1998 b)
- Organización Meteorológica Mundial. Cálculo de las normales estándar mensuales y anuales de 30 años: preparado por una reunión de expertos, Washington, D.C., EE.UU, marzo de 1989. WCDPNo. 10, OMM, Ginebra. (1989)
- Organización Meteorológica Mundial. Función de las normales climatológicas en un clima cambiante. WCDMP-No. 61, OMM-TD No. 1377, OMM Ginebra, marzo de 2007

ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES MODELOS PARAMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA DIRETA NA INCIDÊNCIA NORMAL (DNI) EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

C. M. Santos^{1a}, J. F. Escobedo^{2b}, C. O. Carvalho^{3a}, M. B. P. Silva^{4b}, J. M. S. Ferrari^{5b}.

^aFaculdade de Engenharia Agrônômica – UFPA, Altamira, PA, Brasil, e-mail: ciceromanoel2007@gmail.com

^bFaculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP.

Recibido 10/08/18, aceptado 24/09/18

Resumo: A modelagem da irradiância direta na incidência normal (DNI) na condição de céu claro é importante para diferentes aplicações solarimétricas. Neste estudo, é apresentada uma revisão de 12 modelos de transferência radiativa. Esses modelos são usados para estimar a DNI em dia de céu claro na partição horária na região de Botucatu/SP/Brasil. Os modelos revisados são categorizados em duas classes: modelos simples e complexos. Foram utilizados MBE, RMSE e MAPE para avaliar o desempenho dos modelos. Os modelos que exigem mais entradas atmosféricas (modelos complexos) tiveram um desempenho melhor do que os modelos mais simples. A estimativa de DNI com os modelos mais simples é menos preciso e apresenta erros maiores. Apesar de limitações consistentes no uso de parâmetros estimados, o desempenho dos modelos pode ser considerado satisfatório com base na métrica dos índices estatísticos. Os melhores desempenhos são destacados para os modelos #10 (MRM5) e #12 (Yang).

Palavras-chave: Irradiância solar, Céu claro, Transferência radiativa, Validação.

INTRODUÇÃO

O conhecimento de DNI, por meio de séries temporais ou modelos de estimativa, é importante em muitas áreas científicas e tecnológicas. Na engenharia é destaque na geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos, nos processos de conversão térmica por intermédio de sistemas solares concentrados, no aquecimento e iluminação natural de ambientes. Os dados de DNI podem ser utilizados para monitorar tendências de turbidez atmosféricas e poluição durante longos períodos de tempo (Gueymard, 2003a). O estudo da variabilidade e disponibilidade de DNI numa determinada região pode ser feita através de séries temporais ou com uso de modelos de estimativa.

Séries temporais e espaciais são resultados de medidas no tempo e espaço, e permitem conhecer a disponibilidade solar diurna, sazonal e anual em função do tempo e do espaço. No entanto, sua obtenção exige que as medidas de DNI sejam realizadas rotineiramente por longos anos através de sensores solares. Na ausência de medidas confiáveis e na indisponibilidade de uma série contínua, modelos de estimativa têm sido utilizados com grande frequência para gerar dados de DNI, os modelos para a DNI são separados em estatísticos e paramétricos (Madkour et al., 2006). Os modelos paramétricos exigem entrada mista de

¹Professor da Faculdade de Engenharia Agrônômica - UFPA.

²Professor da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP.

³Graduanda em Engenharia Agrônômica – UFPA.

⁴Eng. Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem.

⁵Mestranda em Irrigação e Drenagem.

parâmetros meteorológicos, tais como concentrações de aerossóis, vapor de água, ozônio, nuvens, gases, massa óptica e fator de turbidez. São classificados em diferentes classes, de acordo com as variáveis de entrada (Gueymard e Ruiz-Arias, 2015).

Alguns modelos parametrizados (transferência radiativa) são mais complexos e precisos, pois levam em consideração informações detalhadas das condições atmosféricas - variáveis frequentemente utilizadas como indicadores do tipo, quantidade e distribuição de nuvens, ou outras observações (radiação solar fracionada, turbidez atmosférica, vapor de água, concentração de ozônio, aerossóis e quantidade de água precipitável) (Gueymard e Ruiz-Arias, 2015).

Os modelos paramétricos, fundamentados em princípios físicos de transferência radiativa, estão relacionados aos processos de absorção e espalhamento do feixe solar quando atravessa a atmosfera terrestre. Estes levam em consideração a interação com os processos de atenuação: espalhamento Rayleigh (T_R), absorção pelo ozônio (T_o), absorção por gases (T_g), absorção pelo vapor d'água (T_w) e atenuação pelo aerossol (T_A). A atenuação na atmosfera é inteiramente dependente da água precipitável, pressão atmosférica, massa óptica do ar e dos parâmetros de turbidez atmosférica de Ångström (β e α) (Gueymard, 2003b).

Diante disto, o trabalho tem como objetivo avaliar doze modelos paramétricos para estimativa da irradiância direta na incidência normal (DNI) em Botucatu. Os modelos foram selecionados de acordo com os parâmetros de entradas, a disponibilidade de dados no local e a menor complexidade com relação a outros modelos existentes na literatura. A avaliação dos modelos permitirá estimar a DNI em função dos constituintes atmosféricos, através dos princípios de espalhamento e absorção equacionados em modelos matemáticos. Há pouquíssimas informações disponíveis na literatura sobre a utilização de modelos parametrizados na estimativa de DNI no Estado de São Paulo, e em particular, Botucatu. Os resultados serão de grande importância para avanços solarimétricos na região.

MATERIAL E MÉTODOS

Local e Instrumentação.

Os dados utilizados foram da cidade de Botucatu, localizada no Estado de São Paulo – Brasil. Botucatu é a sexta mais populosa cidade da região Centro-Oeste Paulista e possui área total de 1.483 m^2 . A Estação de Radiometria solar está instalada na Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP (latitude 22.85°S; longitude 48.45°W e altitude 786m). A Figura 1 ilustra a localização de Botucatu e da estação radiométrica. Botucatu é a única cidade da região Centro-Oeste Paulista que possui medidas simultâneas de irradiação Global, Direta e Difusa a longo prazo.

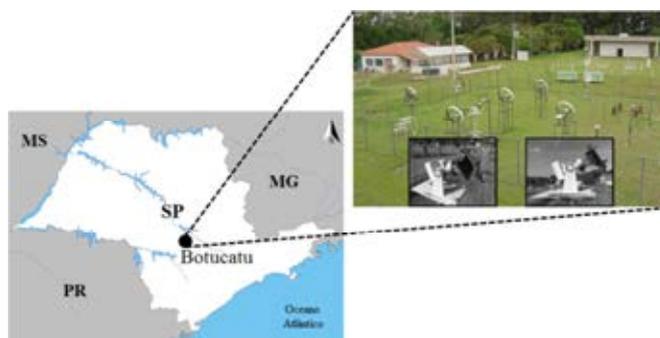


Figura 1: Localização da estação radiométrica.

Com bioma de cerrado e mata atlântica, Botucatu possui clima temperado quente (mesotérmico), verão quente e úmido com elevada precipitação e inverno seco (Escobedo et al., 2011). Com base numa série climática de 38 anos (1971 a 2009), a precipitação média anual acumulada é de 1.494,10 mm, com chuvas mensais entre 40.12±41.76 mm (junho) e 270.49±110.36 mm (janeiro). A umidade relativa do ar varia de 62.61±8.88% (agosto) a 76.26±8.24% (fevereiro), com média anual de 69.93±4.44%. A temperatura do ar varia de 23.21±1.20°C em fevereiro a 17.16±1.33°C em julho e temperatura do ar

média anual de $20.46 \pm 2.21^\circ\text{C}$. O período mais chuvoso ocorre de outubro a março (primavera-verão) e o menos chuvoso entre abril e setembro (outono e inverno).

Para uma modelagem mais precisa, o uso de uma longa série climática é de grande importância na área solar. Neste estudo, serão utilizados dados de irradiância direta na incidência normal (DNI, W/m^2), período de 1996 a dezembro de 2008. A DNI foi monitorada por pireliômetro da Eppley NIP acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. O erro de medição de DNI está relacionado com a precisão do equipamento Eppley. Para aquisição de dados, foi utilizado um registrador de dados Campbell Scientific CR23X com uma frequência de amostragem de 1 Hz. Os quais foram coletados a cada 1 segundo e foram armazenadas médias a cada 5 min, que posteriormente, foram utilizados para obtenção das médias horárias.

Modelos paramétricos (transferência radiativa).

Muitas aplicações de energia solar requerem uma avaliação da entrada de DNI para sistemas de energia solar a partir de dados meteorológicos. Dados de céu sem nuvens são particularmente importantes porque correspondem à potência máxima de sistemas solares, necessários para a concepção e dimensionamento de sistemas solares (Gueymard, 2008).

Os modelos de transferência radiativos são potencialmente capazes de preverem com elevada precisão valores compatíveis com dados medidos de DNI, sendo parametrizados e baseados na física da interação entre a irradiância solar e os constituintes atmosféricos (Gueymard, 2003b). Estes modelos sempre dependem do ângulo solar zenital, Z , e de um número limitado de outros fatores, tipicamente até oito, cujo papel é o de descrever as condições atmosféricas. Outros modelos tomam a geometria solar em consideração através da massa relativa do ar (m_r) em vez de Z . Os modelos mostram que, na condição de céu limpo, DNI é afetado principalmente pela Profundidade Óptica do Aerossol (AOD), e em segundo lugar pela água precipitável (w). Os modelos que serão avaliados aqui foram selecionados a partir de diferentes fontes (Gueymard, 2003a; Gueymard, 2012; Gueymard e Ruiz-Arias, 2015). A seleção dos modelos foi pela necessidade de indicar os modelos com maior potencial de estimativa de DNI na região de Botucatu para aplicações solarimétricas, levando em consideração os parâmetros de entrada, a disponibilidade de dados no local e a menor complexidade com relação a outros modelos existentes na literatura. Além disso, neste estudo limitamos a avaliação destes modelos por considerarmos que são mais frequentemente citados na literatura. A lista completa do conjunto dos modelos selecionados é mostrada na Tabela 1, juntamente com as entradas que eles dependem, bem como os autores que propuseram.

Código	Modelo	Publicação	Entradas
#1	Majumdar	Majumdar (1972)	p, w
#2	Allen	Allen (1996)	p, w
#3	Ghouard	Saïghi (2002)	descrito no texto
#4	Perrin I	Mghouchi et al. (2016)	descrito no texto
#5	HLJ	Hottel (1976)	descrito no texto
#6	Fu	Fu e Rich (1999)	descrito no texto
#7	Heliosat-1	Dumortier (1995)	TL
#8	Bird	Bird e Hulstrom (1980)	p, w, l, β, α
#9	Iqbal - C	Iqbal (1983)	p, w, l, β, α
#10	MRM5	Kambežidis e Psiloglou (2008)	p, w, l, β
#11	Perrin II	Perrin de Brichambaut e Vauge, (1982)	p, w, l, β
#12	Yang	Yang et al. (2001)	p, w, l, β

Tabela 1: Informações gerais sobre os modelos de radiação.

Os modelos indicados que não tem entrada dependem dos seguintes fatores: modelo #3 (baseiam nas avaliações dos fatores perturbadores dependendo das condições atmosféricas e parâmetros astronômicos), modelo #4 (parâmetros astronômicos), modelo #5 (parâmetros astronômicos e elevação) e modelo #6 (altitude do local e do ângulo zenital solar). Embora alguns modelos tenham sido propostos utilizando constante solar definida na época, neste estudo o valor será padronizado (fixado em 1367.0 Wm^{-2}). As possíveis entradas atmosféricas são: pressão atmosférica da estação, p

(ou, para resultados equivalentes na prática, elevação da estação), água precipitável total (w), quantidade total de ozônio (l), fator de turbidez de Linke (TL), AOD, coeficiente de turbidez Ångström (β) e expoente de Ångström (α). Todos os modelos usam o ângulo zenital solar, Z , direta ou indiretamente através do cálculo de m_r , além dos fatores astronômicos. Convém destacar que os modelos de #1 a #6 são classificados com modelos simples. O modelo #7 é simples e baseado na turbidez de Linke. Os modelos de #8 a #12 são caracterizados por serem complexos. Essa classificação é considerada a partir da quantidade de parâmetros de entrada exigida por cada modelo e a eficiência em estimar DNI.

Os modelos de Majumdar (#1) (eq. 1) e Allen (#2) (eq. 2) foram originalmente desenvolvidos para condições de "baixa turbidez atmosférica", ou seja, condição de céu claro:

$$DNI = 0.955 \cdot E_{on} \left[0.8644 \left(\frac{p - m_a}{1000} \right) \times 0.8507^{(m_a w) \cdot 0.25} \right] \quad (1)$$

$$DNI = 0.98 \cdot E_{on} \cdot \exp \left[-\frac{0.00146p}{(k \cos Z)} - 0.075 \left(\frac{w}{\cos Z} \right)^{0.4} \right] \quad (2)$$

onde, m_a é aqui assumido como sendo obtido a partir de Z pela equação de Kasten, p é a pressão na superfície, w é a quantidade de vapor de água em um caminho vertical e k é um "coeficiente empírico de turbidez". Como não existe nenhum método prático para relacioná-lo com medições de turbidez reais. O valor padrão $k = 1$ (de "céu limpo") será usado em todos os momentos no presente caso. O modelo de Ghouard (#3) (eq. 3) estima DNI não levando em conta o fluxo solar absorvido e refletido pelos componentes atmosféricos:

$$DNI = E_{sc} E_o A_1 \exp \left(-\frac{A_2}{\sin(h)} \right) \sin(h) \quad (3)$$

sendo E_o a excentricidade da órbita da terra, E_{sc} é a constante solar, A_1 e A_2 são os coeficientes do fator de turbidez para condição de céu em condições normais tabelados. A elevação solar (h , graus) é o ângulo entre o plano horizontal com a direção do Sol, varia entre 90° (zênite) e -90° (nadir). Em 1975, Perrin Brichambaut propôs um modelo (#4) (eq. 4) que é uma função dos parâmetros astronômicos:

$$DNI = R \cdot \exp \left(-\frac{A_2}{B \sin(h + 1)} \right) \quad (4)$$

onde R (W/m^2) é a irradiância extraterrestre aparente, A e B (adimensional) são valores empíricos para calcular a irradiância solar. O modelo de Hottel (#5) (eq. 5) resulta da combinação popular de modelo banda larga para transmissão direta. A formulação de Hottel para uma visibilidade de 23 km é convencionalmente usado na literatura e será utilizada também aqui:

$$DNI = E_{on} \left[a_0 + a_1 \exp \left(-\frac{a_2}{\cos Z} \right) \right] \quad (5)$$

onde os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 dependem da elevação. O modelo de Fu e Rich (#6) (eq. 6) simples desenvolvido especificamente para aplicações de GIS é a base do analista de energia solar, um componente da rotina Spatial Analyst, parte do software ArcGIS da ESRI:

$$DNI = E_{on} \times T_b^{m_f} \quad (6)$$

onde a T_b é uma transmitância atmosférica em massa, com um valor recomendado de 0,5, e m_f é a massa de ar corrigido pela altitude. A parte de céu limpo do modelo Heliosat-1 (#7) (eq. 7) é composto por uma combinação de algoritmos separados para irradiação direta e irradiação difusa. Uma vez que estes documentos não são facilmente disponíveis, as principais equações são fornecidas:

$$DNI = E_{on} \times \exp(-m_r \times \sigma \times T_L) \quad (7)$$

onde T_L é a turbidez atmosférica de Linke, σ é calculado e m_r . A estrutura base dos modelos complexos segue o modelo original de Bird e Hulstrom (1980), que desenvolveram um modelo paramétrico para estimar a DNI para condições de céu claro, em função da absorção e transmissão pelos componentes atmosféricos, tais como o ozônio, gases, vapor d'água e aerossóis:

$$DNI = 0.9662 \cdot E_o \cdot E_{sc} \cdot T_R \cdot T_o \cdot T_g \cdot T_w \cdot T_a \quad (8)$$

Sendo: (T_R) transmitância devido à dispersão de Rayleigh, (T_o) a transmitância devido ao ozônio, (T_g) a transmitância devido aos gases, (T_w) absorção devido ao vapor d'água e (T_a) a transmitância devido ao aerossol. Todas as transmitâncias são adimensionais. T_R e T_a são transmissões devido a espalhamento de Rayleigh e Mie, T_g , T_o e T_w as transmissões devido aos gases mistos, à dispersão de ozônio e vapor de água, respectivamente. O fator 0.9662 está incluído de acordo com o intervalo espectral considerada ser 0.3 – 3 μm . E_o (sem dimensão) é o fator de correção da excentricidade da órbita da Terra:

$$E_o = 0.0011 + 0.34221 \times \cos \Gamma + 0.0128 \times \sin \Gamma + 0.00719 \times \cos 2\Gamma + 0.00077 \times \sin 2\Gamma \quad (9)$$

Onde o ângulo do dia (Γ , em radianos) é dado por:

$$\Gamma = 2\pi \times \left(\frac{Dj-1}{365} \right) \quad (10)$$

DJ é o dia Juliano, sendo 1 para o 1 de janeiro e 365 para o dia 31 de dezembro. E_{sc} é a constante solar (1367.0 Wm^{-2}). As transmitâncias são expressas matematicamente como:

$$T_R = \exp \left[-0.0903 \times (m_r)^{0.84} \times (1.0 + m_r - (m_r)^{1.01}) \right] \quad (11)$$

$$T_o = 1.0 - \left[0.1611 \times U_3 \times (1.0 + 139.48 \times U_3)^{-0.3035} - 0.002715 \times U_3 \times (1.0 + 0.044 \times U_3 + 0.0003 \times U_3^2)^{-1} \right] \quad (12)$$

$$T_g = \exp \left[-0.0127 \times (m_r)^{0.26} \right] \quad (13)$$

$$T_w = 1 - \left\{ 2.4959 \times U_1 \times \left[(1.0 + 79.034 \times U_1)^{0.6828} + (6.385 \times U_1) \right]^{-1} \right\} \quad (14)$$

$$T_a = \exp \left[-K_a^{0.873} \times (1.0 + K_a - K_a^{0.7088} \times (m_a)^{0.9108}) \right] \quad (15)$$

Onde: m_a (adimensional) é a massa de ar a pressão real, m_r (adimensional) é a massa de ar à pressão normal (1013.25 mbar), U_1 (cm) é o comprimento óptico parente corrigido da água precipitável, K_a (dimensão) é a espessura óptica aerossol e U_3 (cm) é comprimento da profundidade óptica relativa do ozônio sob condições normais de temperatura e pressão. Eles são calculados por:

$$m_a = \frac{1}{\sin(h) + \left\{ 9.4 \times 10^{-4} \times [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253} \right\}} \quad (16)$$

$$m_r = m_a \times \left(\frac{P}{1013.25} \right) \quad (17)$$

$$U_1 = w \times m_a \quad (18)$$

$$U_3 = l_{oz} \times m_a \quad (19)$$

$$K_a = 0.2758 \times K_{a\lambda_1} + 0.35 \times K_{a\lambda_2} \quad (20)$$

Porque estas profundidades ópticas espectrais geralmente não são conhecidas, (Eq. 20), foi modificada aqui através da utilização da lei de Ångström:

$$K_{a\lambda} = \beta_A \times \lambda^{-1.3} \quad (21)$$

Onde: $\lambda_1 = 0.38 \mu\text{m}$ e $\lambda_2 = 0.50 \mu\text{m}$. λ (μm) é o comprimento de onda, β_A e α_A são os coeficientes de turbidez de Ångström (Tabela 2). Para o único valor do expoente de comprimento de onda considerado, teremos:

$$K_a = 1.832 \times \beta_A \quad (22)$$

Zonas climáticas	β_A	α_A
Zona rural	0.05	0.11
Zona urbana	0.10	0.22
Zona industrial	0.30	0.66

Tabela 2: Coeficiente de turbidez de Ångström.

p (mbar) é a pressão do ar local, z (m) é a altitude do local, l_{oz} é a espessura (em cm) da quantidade total de ozônio na direção vertical reduzida à pressão padrão e w (cm) é a espessura de vapor de água

precipitável reduzida para a pressão normal e a temperatura (T) de 273 K, é calculado com a espessura de vapor de água precipitável sob a condição real (w_0) (cm). Todos estes são obtidos por:

$$p = 1013 \times (1 - 2.257 \times 10^{-5} \times z)^{5.26} \quad (23)$$

$$l_{oz} = \frac{1}{9.4 + 0.9 \times m_a} \quad (24)$$

$$w = w_0 \times \left(\frac{p}{1013.25} \right)^{\frac{3}{4}} \times \left(\frac{273}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$$T = 288 - 6.5 \times 10^{-3} \times z \quad (26)$$

Os modelos complexos demandam de parâmetros de entrada. Na ausência de medidas de alta qualidade na região de interesse, utiliza-se a estimativa desses parâmetros. Na região de Botucatu medidas de alta qualidade não estão disponíveis, por isso os parâmetros foram estimados utilizando a metodologia descrita nas equações (1 – 19) (Mghouchi et al., 2016). Esta metodologia para o modelo #8 (Bird e Hulstrom, 1980), quando necessário, também foi utilizada para o cálculo dos parâmetros dos outros modelos paramétricos (#9 a #12). Maiores detalhes das equações dos modelos (#4 - #7 e #9 - #12) são encontradas (Gueymard, 2003a; Gueymard, 2012; Gueymard e Ruiz-Arias, 2015).

Indicativos Estatísticos.

Os indicativos estatísticos Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE) e Mean Absolute Percentage Error (MAPE) foram empregados na avaliação do desempenho dos modelos. MBE, RMSE e MAPE são expressos em porcentagem da média da medida. As definições detalhadas destes índices e as equações são encontradas Gueymard, (2014).

RESULTADOS

Comparação e validação dos modelos paramétricos.

Os modelos foram avaliados levando em consideração à base total de dados. Foram consideradas medidas somente na condição de céu claro. O número total de medições foi de 20.311 horas, correspondente ao período de fevereiro de 1996 a dezembro de 2008. Os critérios adotados na seleção dos dados para a aplicação nos modelos foram baseados em Karayel et al. (1984), onde a DNI deve ser maior que 200 Wm^{-2} e a razão entre a irradiação difusa pela global menor que 1/3. Além disso, foi considerado que a transmissividade atmosférica (K_t) da irradiação solar global (H_g) não pode ser menor que a 0.675. Os parâmetros de entradas utilizados foram na mesma partição de tempo da modelagem, valores horários. Os valores de MBE são mostrados na Figura 2a, como era de se esperar, os modelos que usam mais parâmetros atmosféricos tem um desempenho geralmente melhor e mais consistente do que aqueles que usam poucas ou nenhuma dessas entradas. Os resultados mostram que os modelos #1 a #5 e #12 superestimaram as medidas, enquanto que os demais subestimaram. A maior superestimava é observada para o modelo #2 e a maior subestimativa para #6, com valores de MBE entre -25% e 25%. Os menores valores de MBE são observados para os modelos mais complexos, com destaque para os modelos #10 (MRM5) e #12 (Yang) com valores iguais a -0.16 e 0.36%, respectivamente. O modelo #7, considerado mais simples e baseado na turbidez de Linke, subestimou as medidas próximo de zero (MBE = -1.20 %).

No geral, a maioria dos modelos mostram valores absolutos de MBE menores que 10%. O desempenho inferior dos modelos mais simples, considerando a base total, está condicionado aos parâmetros utilizados como entrada. Além disso, o desempenho dos modelos mais complexos pode ter sido afetado pelo uso na entrada de parâmetros estimados, devido à indisponibilidade de medidas na região de Botucatu. É sabido que a avaliação de DNI de céu claro é feito com maior precisão se os instrumentos de medidas forneceram os parâmetros de entrada na mais alta resolução possível. Polo e Estalayo (2015) destacam que outras fontes de aerossóis que existem e está mais prontamente disponível em escala global, a qualidade é inferior e resulta em estimativas de DNI substancialmente distorcidas.

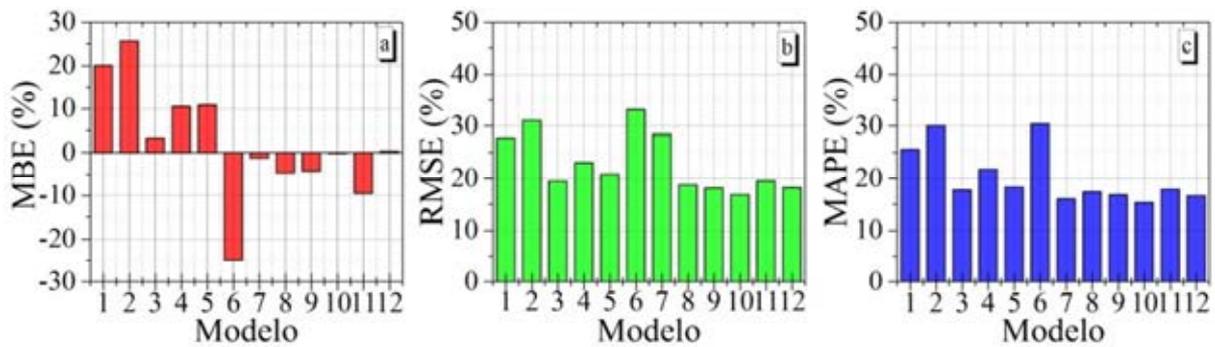


Figura 2: Índices estatísticos para DNI prevista por 12 modelos. a) MBE (em porcentagem), b) RMSE (em porcentagem) e c) MAPE (em porcentagem).

A Figura 2b resume o índice RMSE de comparação entre os valores de DNI medidos e estimados pelos doze modelos. Os resultados mostram que os modelos mais simples tiveram maiores dispersão, com destaque negativo para os modelos #1 (RMSE = 27.78%), #2 (RMSE = 31.11%), #6 (RMSE = 33.18%) e #7 (RMSE = 28.46%). Com exceção do modelo #7, os valores de RMSE estão de acordo com os índices de MBE dos mesmos modelos. Os maiores erros podem ser explicados pelo modo simplista utilizado na maioria destes modelos que descrevem a física dos processos de transferência radiativa.

Embora os resultados mostrem incertezas nas estimativas de DNI, os modelos mais complexos responderam bem aos parâmetros de entrada estimados, mas as estimativas de DNI foram sensíveis aos parâmetros de entrada. Apesar das dificuldades em prever DNI considerando as estimativas dos parâmetros de entrada e a dinâmica atmosférica, os modelos demonstram precisões satisfatórias. Nos dias atuais existem vários modelos para prever DNI com alta precisão nas condições de céu limpo, enquanto que a simulação para condição de céu nublado incluem altas incertezas devido a vários desafios na parametrização das propriedades ópticas das nuvens e na interação com aerossóis atmosféricos. Erros no AOD resultam em necessariamente em erros no DNI estimado. Pode-se argumentar que os valores de RMSE são geralmente grandes, mas ainda correspondem a erros absolutos relativamente pequenos, uma vez que o DNI foi estimado utilizando parâmetros estimados, mas em qualquer caso há espaço para melhorias na modelagem.

Os valores de MAPE para os modelos são mostrados na Figura 2c. O maior valor de MAPE (= 30.4 %) é observado para o modelo #6 e o menor (MAPE = 15.28 %) para o modelo #10. Os modelos mais simples apresentam MAPE maiores que dos modelos mais complexos, como é observado para #1 (MAPE = 25.6%), #2 (MAPE = 30.07 %) e #4 (MAPE = 21.82%). O valor de MAPE (16.04%) do modelo #7 tem a mesma tendência dos demais índices estatísticos, gerando erros semelhantes aos modelos mais complexos. Os modelos considerados mais complexos apresentam valores de MAPE menores que 20%. Os modelos mais simples resultaram em média MAPE = $22.86 \pm 5.92\%$ e os mais complexos MAPE = $16.81 \pm 0.98\%$, que representa uma diferença de 26.47%. Levando em consideração que os parâmetros de entrada foram estimados, estes resultados podem ser considerados satisfatórios. Inconsistências ou erros são inerentes às diferenças nas funções de transmissão de cada modelo, assim como, podem ser atribuídos nas estimativas dos parâmetros de entradas. Os erros nos parâmetros de entrada podem se propagar e afetar consideravelmente as estimativas de DNI. Gueymard (2004) destacou que erros na estimativa de DNI podem ser atribuídos ao erro na determinação nos valores de w e β nas diferentes posições solares.

Os modelos com piores desempenhos estatísticos, não significam necessariamente que não se aplicam corretamente a atmosfera de Botucatu. É provável que os modelos que resultam em uma grande diferença entre as medidas e estimativas foram desenvolvidos para estimar DNI em determinados locais. Podemos destacar que os modelos #10 e #12 estimaram com um pouco mais de consistência que os demais modelos, oferecendo informações mais precisas sobre o DNI do que os demais modelos mais sofisticados e modelos simples. Em relação ao modelo de Yang (#12), os presentes resultados confirmam as investigações de Gueymard (2012), no sentido de que suas estimativas de DNI eram razoavelmente boas e discorda dos resultados de Younes e Muneer (2007). Destacamos que mais

validações são necessárias para avaliar melhor o seu desempenho. Principalmente, utilizando parâmetros com medidas locais e de alta qualidade. O modelo simples #3 também se saiu surpreendentemente melhor que alguns modelos bem conhecidos para o mapeamento de recursos solares. Além disso, considerando os valores dos índices estatísticos, o modelo #7 baseado no coeficiente de turbidez de Linke teve desempenho superior a alguns modelos mais sofisticados. Isso corrobora os resultados achados em Gueymard (2005) e também em Gueymard e Ruiz-Arias (2015) e confirma que a turbidez é uma entrada essencial para obter uma precisão razoável nas previsões de DNI. Os modelos mais sofisticados podem prever DNI com incerteza aceitável, no entanto, isso só pode ser alcançado se forem fornecidos dados de entrada de alta qualidade e alta frequência (Gueymard, 2012).

Variação de DNI e transmitância total em função de m_r e ES.

O produto das transmitâncias ($T_R \cdot T_o \cdot T_g \cdot T_w \cdot T_a$), obtidos pelos modelos #8 a #12 denominamos de transmitância total (τ_{total}). Estamos considerando que o modelo #11 também possui uma transmitância total, apesar de possuir um equacionamento diferente. A curva de correlação entre a transmitância total e a massa relativa de ar (obtida pela equação 17) é a mostrada na Figura 3a e a curva da correlação entre a transmitância total e a elevação solar na Figura 3b. As curvas foram elaboradas para observar o comportamento de τ_{total} em função desses parâmetros na atmosfera de Botucatu. Ao fazer a correlação, as curvas exponenciais confirmam a Lei de Beer para os modelos #8 a #12. Observa-se que a τ_{total} diminui exponencialmente com o comprimento percorrido pelos raios solares, ou seja, quanto menor o ângulo maior a atenuação. Além disso, o caminho atmosférico percorrido por DNI é menor nos locais de altitudes mais elevadas, assim a atenuação ocorre em maior grau nos locais localizados ao nível do mar (Gutiérrez-Trashorras et al., 2018). A região de estudo fica localizada a 786 m de altitude, que representa um menor caminho ótico a ser percorrido e consequentemente menor atenuação, quando comparado ao nível do mar.

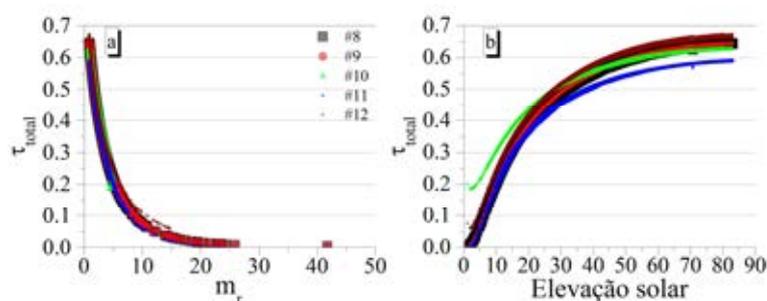


Figura 3: Curva de correlação entre a transmitância total (τ_{total}) e: a) massa do ar relativa (m_r) e b) Elevação solar (ES).

Comparação e validação dos modelos selecionados: Estudo de caso.

O desempenho dos modelos para dias específicos foi testado através de comparações entre as medidas e as estimativas. Os resultados obtidos de cada modelo durante os dias selecionados são visualizados na Figura 4(a – d), que mostra a evolução diurna para valores horários entre 06 e 18 h. Para analisar o modelo mais preciso sob o clima de Botucatu, apenas dias de céu claro em períodos diferentes foram considerados, no intuito de testar e validar. Os dias selecionados foram 30/12/2002 (Fig. 4a), 17/10/2003 (Fig. 4b), 17/01/2006 (Fig. 4c) e 21/11/2007 (Fig. 4d). As Figuras 4 (a – d) evidenciam que os valores de DNI estimados por alguns modelos mostram uma boa aproximação com os valores medidos. Os valores de DNI medidos e estimados pelos modelos crescem do início para o meio do dia, no mesmo sentido do aumento do ângulo de elevação solar, e das diminuições da massa ótica e da concentração de nuvens na atmosfera. A exceção é para a estimativa com o modelo #4 que possui comportamento inverso entre às 07:00 e 17:00h, diferente dos demais modelos mostra uma parábola com concavidade voltada para cima. As estimativas com os modelos acompanham bem as medidas. Os modelos #1 e #2 normalmente possuem suas curvas acima da medida, enquanto as demais estão

abaixo. Destacamos o modelo #6 que mostra com maior frequência está abaixo e mais distante da curva das medidas.

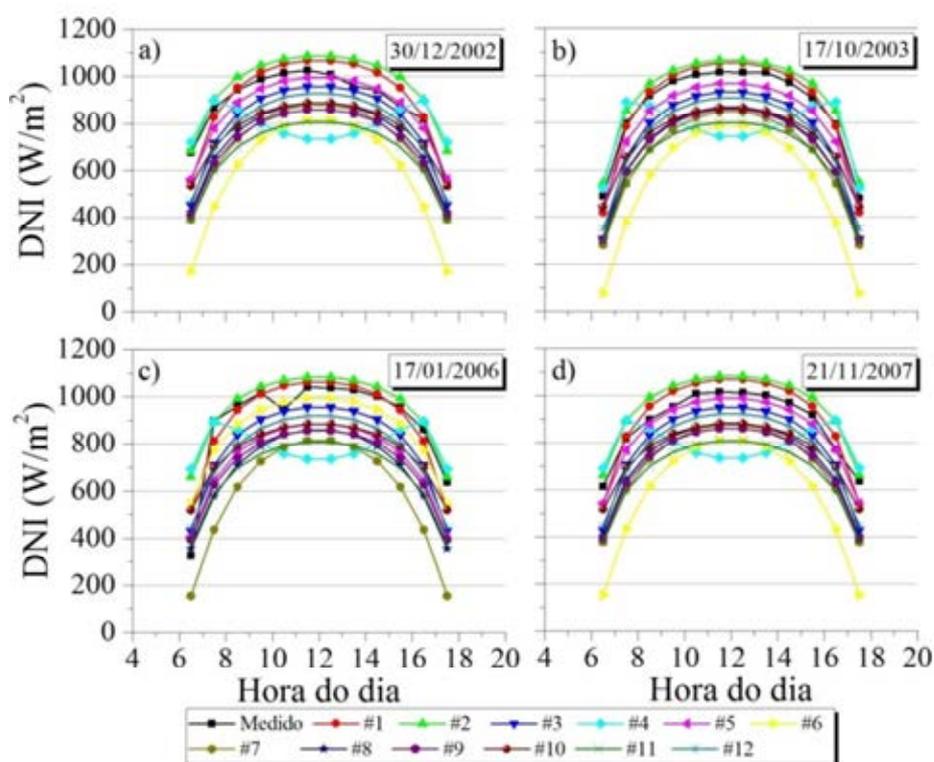


Figura 4: DNI medido e estimado pelos doze modelos para os dias selecionados. a) 30/12/2002, b) 17/10/2003, c) 17/01/2006 e d) 21/11/2007.

Os índices estatísticos de validação MBE, RMSE e MAPE para os dias selecionados são mostrados na Figura 5a – c. Esses índices permitem a detecção tanto das diferenças entre os dados experimentais quanto das estimativas dos modelos e da existência de tendências sistemáticas de subestimar ou superestimar. Os valores elevados ocorrem devido à propagação de erros como resultados do uso de parâmetros de entrada teóricos. Os modelos #3 a #12 subestimaram as medidas em todos os dias analisados (Figura 5a). Os modelos #1 e #2 superestimaram as medidas na maioria dos dias, concordando com a evolução diurna. Similarmente aos modelos #1 e #2, o modelo #5 subestimou com valores absolutos de MBE menores que 10%. Os menores valores de RMSE foram encontrados para os modelos #1 e #5, indicando não ultrapassar de 11% à dispersão (Figura 5b). Os maiores RMSE são para o modelo #6, resultando para os dias analisados valores superiores a 30%. Os modelos #9 e #11 estimaram com RMSE maiores que 20%. Em suma, os modelos #1 a #5 foram melhores que os modelos #6 a #12. Seguindo a mesma tendência de MBE e RMSE, o pior desempenho ao analisar o MAPE é encontrado para o modelo #6 (Figura 5c), que para alguns dias teve valores superiores a 40%. Para os modelos #1 a #5 a maioria dos valores de MAPE foram menores que 15%, enquanto os demais modelos acima de 15%.

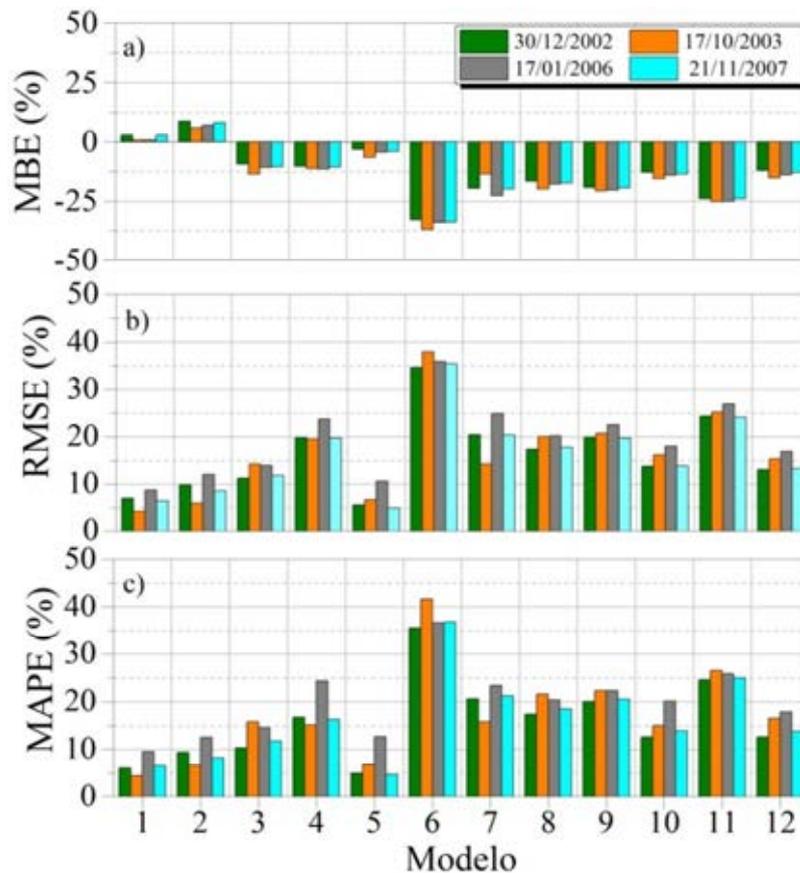


Figura 5: Índices estatísticos para os dias selecionados: a) MBE, b) RMSE e c) MAPE.

As análises pontuais desses resultados para os dias selecionados nos levam as seguintes observações: existe diferença no desempenho dos modelos, mesmo aqueles do mesmo grupo (simples e complexos). Existe uma grande diferença entre os sete modelos simples (#1 - #7). Os modelos #1 e #3 foram mais consistentes que os outros modelos mais simples e os mais sofisticados (que usam um grande número de entrada). No entanto, o modelo #6 apresentou maior incerteza. Os modelos mais sofisticados (#8 - #12) tiveram desempenho estatístico inferior ao esperado, resultando em uma maior propagação de erros da estimativa dos parâmetros de entrada dos modelos. As estações especializadas que relatam esses dados ainda são muito escassas, o que constitui uma limitação na modelagem.

Devido à grande variedade de resultados entre modelos simples e os mais complexos, deve ser entendido, por exemplo, que a análise de desempenho dos modelos para dias específicos pode mostrar resultados incompletos e tendenciosos, necessitando de uma validação com série de dados maior. Nessa análise foram utilizados dados específicos dos mesmos dias. Outro ponto a destacar é o fator dos dias separados serem pertencentes a meses do período chuvoso. Uma análise dos modelos com base na sazonalidade torna-se interessante. Como foram observados, os resultados dos modelos simples indicam melhor desempenho que dos modelos mais complexos. Por outro lado, foi observado com a base total que todos os modelos mais complexos executam geralmente melhor a estimativa de DNI do que os modelos mais simples, o que não surpreende.

CONCLUSÕES

Doze modelos de estimativa de DNI foram avaliados para verificar seu desempenho na região de Botucatu, a fim de aplicação solarimétrica para futuros projetos de concentração de energia solar. Esta análise é de grande importância, principalmente nos locais, onde estações solarimétricas não estão disponíveis. Devido a não disponibilidade na região de estudo, alguns parâmetros de entrada dos modelos foram estimados.

Considerando a análise total da base de dados, como seria de esperar, a previsão de DNI com os modelos que demandam mais parâmetros atmosféricos de entrada tendem a ter um desempenho melhor e um pouco mais consistente do que aqueles que exigem poucos ou nenhum desses parâmetros. O modelo #7 com poucos parâmetros de entrada e utilizando a turbidez de Linke tende a apresentar desempenho similar aos dos modelos mais sofisticados. Os modelos #10 (MRM5) e #12 (Yang) tiveram os melhores resultados. Os erros na estimativa dos parâmetros de entrada se propagaram para as estimativas de DNI. Analisando os resultados para os estudos de caso nos dias selecionados, os modelos mais complexos, não foram mais precisos que os modelos mais simples. No entanto, não podemos considerar esse resultado isoladamente. Para um estudo mais apropriado, a análise sazonal torna-se necessário.

O trabalho pode servir como uma ferramenta interessante e necessária para calcular DNI horário para sistemas de energia solar. É conveniente lembrar que os melhores resultados obtidos pelos modelos mais sofisticados são condicionados à disponibilidade de observações locais dos parâmetros com alta qualidade. Mais pesquisas com observações terrestres de alta qualidade para DNI são desejadas para aumentar a precisão de aplicações de energia solar em qualquer local.

REFERÊNCIAS

- Allen R. G. (1996). Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, v.122:97–106.
- Bird R. E. e Hulstrom R. L. (1980). *Direct insolation models*. Golden, CO: Solar Energy Research Institute (SERI/NREL), (SERI/TR-335-344).
- Dumortier D. (1995). *Modelling global and diffuse horizontal irradiances under cloudless skies with different turbidities*. Technical report for the Daylight II project, JOU2-CT92-0144.
- Escobedo J. F., Gomes E. N., Oliveira A. P., Soares J. (2011). Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, v.36, p.169-178.
- Fu P. e Rich P. (1999). Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*.
- Gueymard C. A. (2003a). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: Detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy*, v. 74, p. 355–379.
- Gueymard C. A. (2003b). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high quality measurements. *Solar Energy*, v. 74, p. 381–395.
- Gueymard C. A. (2004). Direct solar transmittance and irradiance prediction with broadband models. Part II: validation with high-quality measurements. *Solar Energy* v. 74, p. 381-395, 2003, with Corrigendum., *Solar Energy*, v.76, p.515.
- Gueymard C. A. (2005). Importance of atmospheric turbidity and associated uncertainties in solar radiation and luminous efficacy modelling. *Energy*, v.30, p.1603–21.
- Gueymard C. A. (2008). REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*, v. 82,p.272–285.
- Gueymard C. A. (2012). Temporal variability in direct and global irradiance at various time scales as a affected by aerosols. *Solar Energy*, doi:10.1016/j.solener.2012.01.013.
- Gueymard C. A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy* v.86, p. 2145–2169.
- Gueymard C. A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.39, p.1024–1034.
- Gueymard C. A. e Ruiz-Arias J. A. (2015). Validation of direct normal irradiance predictions under arid conditions: A review of radiative models and their turbidity dependent performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 379–396.

- Gutiérrez-Trashorras A. J. et al. (2018). Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.81, p.93–106.
- Hottel H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy* 18, 129–134.
- Iqbal M. (1983). *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press. 390p.
- Kambezidis H. D. e Psiloglou B. E. (2008). The Meteorological Radiation Model (MRM): advancements and applications. In: Badescu V, editor. *Modeling solar radiation at the Earth surface*. Berlin: Springer. p. 357–92.
- Karayel M., Navvab M., Ne’eman E., Selkowitz S. (1984). Zenith luminance and Sky luminance distributions for daylighting calculations. *Energy and Buildings*, v. 6, n.3, p. 283-91.
- Madkour M. A., El-Metwally M., Hamed A. B. (2006). Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere. *Renewable Energy*, v. 31, p. 361-382.
- Majumdar N. C. Mathur B. L. Kaushik S. B. (1972). Prediction of direct solar radiation for low atmospheric turbidity. *Solar Energy*, v.13:383–94.
- Mghouchi Y. E. Bouardi A. E. Choulli Z. Ajzoul T. (2016). Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.56, p.87–99.
- Perrin de Brichambaut, C. e Vauge, C. (1982). *Le Gisement Solaire*. Lavoisier, Paris.
- Polo J. e Estalayo G. (2015). Impact of atmospheric aerosol loads on concentrating solar power production in arid-desert sites. *Solar Energy* 115, 621–631.
- Remer L. A. et al. (2008). Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, p. 1-18.
- Saïghi M. (2002). *Nouveau modèle de transfert hydrique dans le système sol- planteatmosphère (Thèse de Doctorat)*. Alger: USTHB.
- Yang K., Huang, G.W. Tamai, N. (2001). A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy*, v. 70, p. 13–22.
- Younes S. e Muneer T. (2007). Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data-base. *Applied Energy* 84, 623–645.

Abstract: The modeling of direct irradiance at normal incidence (DNI) in the clear sky condition is important for different solarimetric applications. In this study, a performance review of 12 radiative transfer models is presented. These models are used to estimate the DNI in day of clear sky in the hourly partition, in the region of Botucatu/SP/Brazil. The revised models are categorized into two classes, simple and complex models. MBE, RMSE and MAPE were used to evaluate the performance of the models. Models requiring more atmospheric inputs (complex models) generally performed better than the simpler models. The DNI estimate with the simpler models is less accurate and has larger errors. Despite consistent limitations in the use of estimated parameters, the performance of the models can be considered satisfactory based on the metric of the statistical indices. The best performances are highlighted for models # 10 (MRM5) and # 12 (Yang).

Keywords: Solar irradiation, Clear sky, Radiative transfer, Validation.

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO INDOOR DE CÉLULAS DE REFERÊNCIA PARA MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

A. P. Rosso¹, G. A. Rampinelli².

Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade
Universidade Federal de Santa Catarina - Rua Pedro João Pereira, nº 150, Mato Alto - Araranguá - SC
Tel. (48) 3721-6944 e-mail: possamairosso@yahoo.com.br

Recibido 09/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMO: A medição da constante solar era estimada no solo terrestre, a partir de medições, após a radiação solar ser inserida na atmosfera. Hoje, com o uso de satélites e foguetes, a constante solar é medida antes de ser inserida na atmosfera e apresenta um valor de $G_{SC} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ com um desvio padrão de $1,7 \text{ Wm}^{-2}$. A medição da radiação solar é importante para o desenvolvimento de projetos que visam à captação e a conversão da energia solar em outros tipos de energia. A partir do conhecimento dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo de todo o ano. Um dos instrumentos mais utilizados para medição da radiação solar são os piranômetros. Estes equipamentos medem a radiação solar global (direta e difusa), e existem dois principais tipos de piranômetros: piranômetro termoeletrico e piranômetro fotovoltaico. Os piranômetros do tipo fotovoltaico são comumente utilizados para medição da radiação solar. A vantagem dos piranômetros fotovoltaicos são o seu baixo custo, a resposta espectral idêntica a de um módulo fotovoltaico convencional de célula de c-Si e o tempo de resposta praticamente instantâneo, na ordem de $10\mu\text{s}$, e linear com a irradiância solar. Este artigo apresenta os ensaios elétricos dos protótipos de células de referência desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os protótipos desenvolvidos passaram pelo processo de laminação para encapsulamento das células que compõem o medidor de radiação solar. Em ensaios com simulador solar foram obtidas as curvas I-V. A repetibilidade do processo de construção dos protótipos e da medição do simulador *indoor* foram analisadas.

Palavras-chave: Radiação solar, células de referência, piranômetro fotovoltaico, resposta espectral, curvas I-V.

1. INTRODUÇÃO

Antes do surgimento de foguetes e naves espaciais, a constante solar era estimada no solo, a partir de medições, após a radiação solar ser inserida na atmosfera, com uma parte absorvida e outra parte espalhada por componentes da atmosfera. As primeiras extrapolações das medidas terrestres foram realizadas no topo de montanhas e foram baseadas em estimativas de transições atmosféricas em vários locais do espectro solar. A partir do uso das aeronaves foram realizadas medições da radiação direta, antes de entrar na atmosfera terrestre e foram executadas com uma variedade de instrumentos contendo nove programas experimentais e resultando em um valor de $G_{SC} = 1353 \text{ Wm}^{-2}$, com um erro de $E = \pm 1,5 \%$ (Duffie, 2006). O valor recomendado pela Organização Meteorológica Mundial foi obtido do valor médio de oito medidas da constante solar, realizadas entre 1969 e 1980. Este valor é $G_{SC} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ com um desvio padrão de $1,7 \text{ Wm}^{-2}$ (Duffie, 2006; Macagnan, 2010).

A medição da radiação solar é importante para o desenvolvimento de projetos que visam a captação e a conversão da energia solar em outros tipos de energia. A partir do conhecimento dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo de todo o ano, onde as variações da intensidade da

radiação solar sofrem significativas alterações. Desta forma, a informação sobre o recurso solar é a variável de maior importância no desenvolvimento de um projeto de sistema de aproveitamento da energia solar. Para que se torne viável financeiramente um projeto fotovoltaico, em média, a radiação solar exigida é de no mínimo 3 a 4 kWh/(m².dia) (Pinho, 2014; Pereira *et al*, 2017).

Os instrumentos mais utilizados para medição da radiação solar são os piranômetros. Estes equipamentos medem a radiação solar global (direta e difusa), e existem dois principais tipos de piranômetros: piranômetro termoeletrico e piranômetro fotovoltaico. Os piranômetros do tipo fotovoltaico são compostos por uma célula fotovoltaica de pequenas dimensões. A vantagem dos piranômetros fotovoltaicos são o seu baixo custo, a resposta espectral idêntica à de um módulo fotovoltaico convencional de célula de c-Si e o tempo de resposta praticamente instantâneo, na ordem de 10µs, e linear com a irradiância solar (Pinho e Galdino, 2014; Bharadwaj e John, 2014).

Este artigo apresenta as etapas de desenvolvimento de 6 protótipos de células de referência para medição da radiação solar, compostos por 1 célula fotovoltaica de Si-mono ou de Si-poli. O trabalho apresenta os resultados de caracterização elétrica dos protótipos e a repetibilidade do método construtivo e a repetibilidade na medição do simulador solar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento dos protótipos e no processo indoor de caracterização elétrica. Esses protótipos foram desenvolvidos em um processo semiprofissional, fazendo uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

2.1 Construção dos protótipos

Para a obtenção dos protótipos, foi utilizado o polímero *tedlar* como material base, o polímero EVA para o encapsulamento da célula fotovoltaica e o vidro como material de cobertura, sendo que foram utilizadas uma célula de silício cristalino. Para o desenvolvimento dos protótipos, primeiramente é usado uma caneta de fluxo nos terminais da célula como pode ser observado na Fig. 1a. Posteriormente para o processo de metalização da célula foi integrado uma fita de estanho (1,8 mm) nas células de silício cristalino utilizando uma estação de solda por indução, conforme apresentado na Fig. 1b.



Figura 1: Fluxo de solda nos terminais da célula (a) e integração da fita de estanho (1,8 mm) na célula fotovoltaica (b).

Em seguida, foi realizado a montagem dos encapsulantes da célula de referência, como pode ser observado na Fig 2. Foi utilizado cortes de *tedlar* para isolar as ligações da célula.

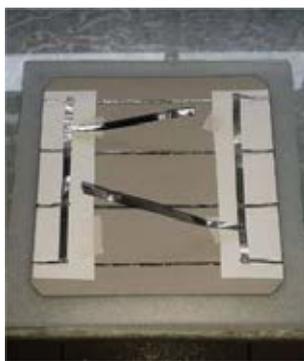


Figura 2: Estrutura da célula de referência.

As células desenvolvidas passaram pelo processo de laminação para encapsulamento da célula fotovoltaica. Para a laminação foi utilizado uma laminadora da marca *Astro* conforme apresentado na Fig. 3.



Figura 3: Laminadora Astro.

No processo de laminação são alcançadas temperaturas entre 120 °C e 150 °C, quando o EVA se torna líquido e as eventuais bolhas de ar geradas são eliminadas (Pinho e Galdino, 2014). No processo de laminação das células, a pressão é reduzida a 650 mmHg e a temperatura atinge 132 °C.

Eventuais defeitos que podem aparecer na fabricação de módulos fotovoltaicos devem ser considerados. Módulos fotovoltaicos com as bordas das células fotovoltaicas em contato é um defeito de fabricação consideravelmente inaceitável, indicando uma péssima qualidade do dispositivo, podendo resultar em modificação imprevisível da curva característica I-V. Outro defeito que pode aparecer são de células quebradas ou rachadas indicando que o dispositivo é de baixa qualidade, justificando, portanto, a sua reprovação. As células com problemas de metalização é outro defeito inaceitável, reduzindo a eficiência das células, por aumentar a resistência em série, limitando assim, o desempenho do módulo (Galdino; Silva, 2014).

A estrutura das células de referência está apresentada na Tab. 1. Após a conclusão do processo de laminação, foram desenvolvidos 6 protótipos de células de referência, as células não apresentaram nenhum eventual defeito apresentado acima e nenhuma formação de bolhas conforme como pode ser observado na Fig. 4.

Protótipos	Estrutura	Célula FV
PROT 1	Vidro/EVA/Tedlar	mono-Si
PROT 2	Vidro/EVA/Tedlar	mono-Si
PROT 3	Vidro/EVA/Tedlar	mono-Si
PROT 4	Vidro/EVA/Tedlar	poli-Si
PROT 5	Vidro/EVA/Tedlar	poli-Si
PROT 6	Vidro/EVA/Tedlar	poli-Si

Tabela 1: Estruturas das células de referência.



Figura 4: Protótipos de células de referência, PROT 1 (1), PROT 2 (2), PROT 3 (3), PROT 4 (4), PROT 5 (5) e PROT 6 (6).

2.2 Caracterização elétrica

O ensaio mais completo e utilizado para analisar, estimar e qualificar uma célula, módulo ou sistemas fotovoltaicos é através do traçado de sua curva característica $I-V$. Em vista disso, muitos sistemas de instrumentação foram desenvolvidos para tal finalidade, sendo que os laboratórios ou departamentos de pesquisa possui uma instrumentação melhor que se adequa à realização dos ensaios (Gasparin, 2009).

O módulo fotovoltaico é submetido às condições padrões de ensaio, uma fonte de tensão variável realiza uma varredura entre uma tensão negativa em relação aos terminais do módulo, até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo com a corrente ficando negativamente. Durante esta varredura são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo o traçado de uma curva característica (Pinho e Galdino, 2014). A Fig. 5 apresenta a curva característica $I-V$ e a curva de potência $P-V$ de um módulo.

Ao avaliar o desempenho de uma célula, módulo ou de um sistema fotovoltaico é extremamente importante que as medições sejam efetuadas em condições operacionais do módulo ou do sistema fotovoltaico (Pinho e Galdino, 2014; Garcia, 2015). O desempenho de células e módulos fotovoltaicos normalmente é associado às condições de teste padrão (Standart Test Conditions –STC), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m^2 ou também conhecido como 1 sol, distribuição espectral correspondente a AM1,5 e temperatura de célula de 25°C . Estas condições de irradiância representam as condições de operação de um dia de céu claro, entretanto, a temperatura em operação frequentemente resulta em

temperaturas próximas a 50 °C. A diferença entre essas temperaturas proporciona também uma diferença entre a potência entregue pelo módulo fotovoltaico e a potência nominal (Macêdo, 2006).

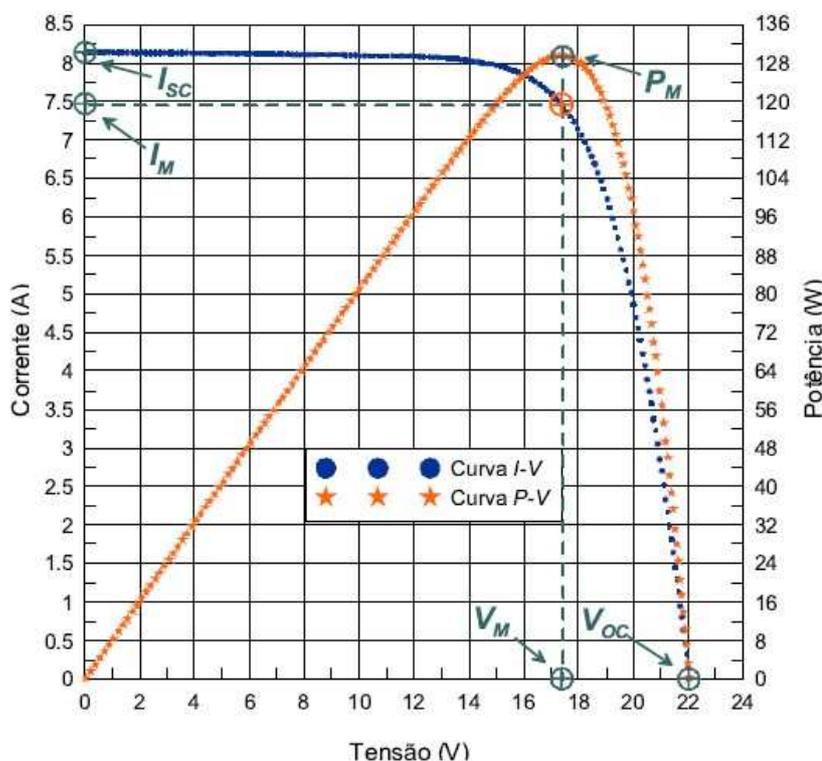


Figura 5: Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo m-Si (36 células) com 130 W de potência e 12 V de tensão nominal (Bühler, 2011).

A caracterização de módulos fotovoltaicos em simuladores solares *indoor* vem se tornando mais comum do que a caracterização em ambiente *outdoor*. Uma vantagem do uso de simuladores solares *indoor* é que o equipamento é independente do clima e do tempo meteorológico, podendo realizar simulações a qualquer momento do dia. Para as empresas produtoras de módulos fotovoltaicos os simuladores solares *indoor* são muito importantes para a certificação do produto final (Carrilo *et al*, 2017). A caracterização das células de referência foi realizada através de um simulador solar (*indoor*). A simulação consiste em verificar os aspectos técnicos e parâmetros das curvas I-V. Os testes foram realizados no laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O simulador solar é um equipamento que conta com lâmpadas especiais para emular as propriedades da radiação solar durante o ensaio da determinação da curva característica de dispositivos fotovoltaicos. A corrente e tensão do módulo que está sendo testado, além da irradiância e da temperatura da célula são medidos e registrados através de um aparelho eletrônico específico (Dalmagro, Krenzinger, 2013). A Fig. 6 apresenta os três tipos básicos de simuladores solares que são diferenciados de acordo com a tecnologia utilizada para a geração de luz.

No simulador solar o sistema de medição é composto por uma carga eletrônica e um conjunto de conversores analógico/digital que realizam a aquisição de variáveis. Os conversores recebem os sinais analógicos dos canais de entrada e transferem para o computador os respectivos valores digitais desses canais. Quando o flash é disparado a carga eletrônica faz a varredura de tensão e o sistema de aquisição mede simultaneamente os valores de corrente, tensão, irradiância e temperatura, podendo determinar a curva I-V de módulos fotovoltaicos e também seu ponto de máxima potência (Mocelin, 2014). As medições dos resultados de ensaios realizados no simulador solar são controladas por um microcomputador conectado à carga eletrônica. Por meio do software de operação do simulador é possível transferir a curva característica medida para as condições padrão de teste (Mocelin, 2014).



Figura 6: Exemplos de simuladores solares (Dalmagro, Krenzinger, 2013).

O simulador é composto de paredes escuras de material com baixa refletância nos comprimentos de onda de interesse. Nesta câmara fica o suporte para o encaixe dos módulos, onde se encontra a célula de referência e o módulo sob teste, a uma distância específica da lâmpada de xenônio geradora do flash (Fig. 7).



Figura 7: Vista interna do simulador com o protótipo para as medições.

Foram realizados ensaios no simulador solar com os seis protótipos desenvolvidos, tendo como intuito, a análise de características elétricas das células de referência como: fator de forma, ponto de máxima potência, corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e curva I-V. O processo de repetibilidade construtiva dos dispositivos e a repetibilidade de medição do simulador solar também são analisados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas características I-V dos protótipos foram obtidas através de um simulador solar (*indoor*) em condições padrão, com irradiância de 1000 W/m^2 , temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5. Os testes foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As curvas I-V dos protótipos PROT 1, PROT 2, PROT 3, PROT 4, PROT 5 e PROT 6 são apresentadas nas Figs. 8 e 9. Para uma produção seriada de células de referência é importante verificar a dispersão dos parâmetros elétricos dos dispositivos. A identidade dos parâmetros elétricos verificados a partir da determinação da Curva I-V dos protótipos desenvolvidos indica alto grau de repetibilidade no processo construtivo.

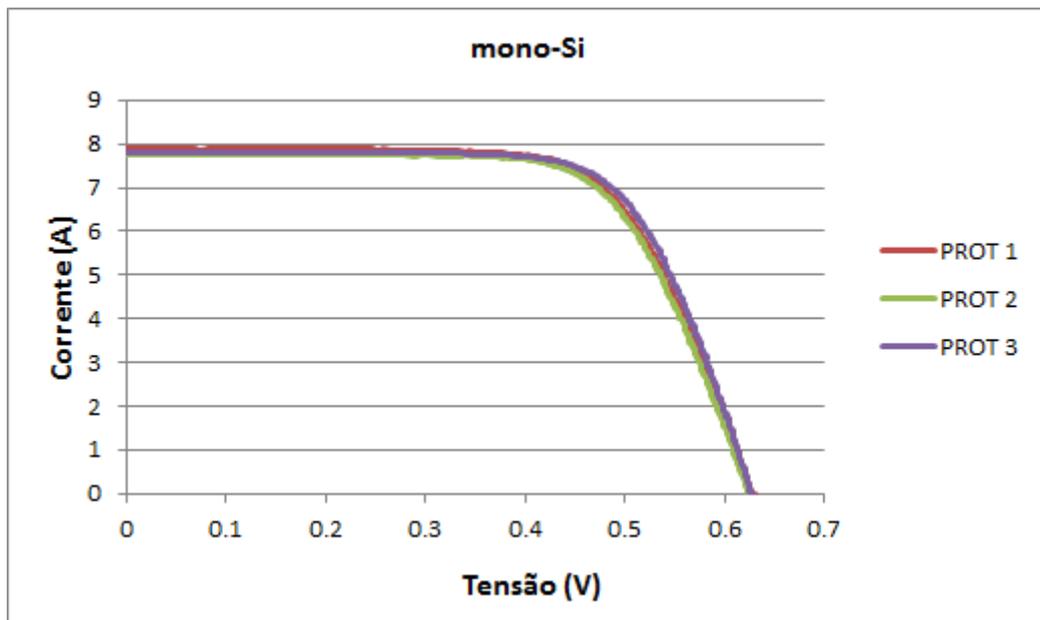


Figura 8: Curvas I-V dos PROT 1, PROT 2 e PROT 3, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5

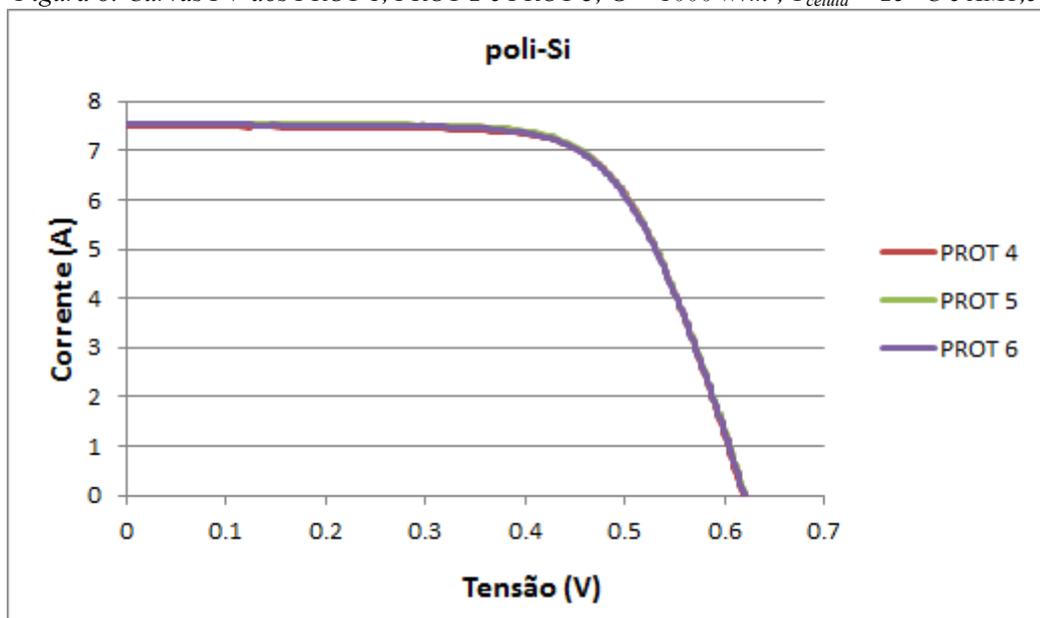


Figura 9: Curvas I-V dos PROT 4, PROT 5 e PROT 6, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5.

Para cada protótipo foram realizadas seis medidas para determinação da curva I-V. A partir desta amostra, é possível avaliar a repetibilidade de medição do simulador solar e, por consequência, aferir o processo de caracterização ou calibração dos protótipos. A irradiância solar pode ser estimada a partir de uma correlação direta com a medida de corrente de curto circuito (I_{SC}) do protótipo, após o processo de calibração do dispositivo. A partir da amostra, foi obtida a média (\bar{X}), o desvio padrão (S) e o erro padrão (E_p) com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada protótipo. Os valores destes parâmetros estão apresentados na Tab. 1.

	I_{SC} (1000 W/m ²)					
	PROT 1	PROT 2	PROT 3	PROT 4	PROT 5	PROT 6
\bar{x}	7.8913	7.7717	7.8262	7.495985	7.570568	7.536656
S	0.003893	0.00399	0.007325	0.003493	0.004698	0.00293
E_p (90%)	0.003202	0.003282	0.006984	0.002873	0.003864	0.002794
E_p (95%)	0.004086	0,004188	0.009094	0,003666	0.004931	0,003637
E_p (98%)	0.005348	0.005481	0.012274	0.004798	0.006454	0.004909

Tabela 1: Médias, desvios padrão e erros padrão das I_{SC} das seis medições de cada protótipo.

Observando a Tab. 1 percebe-se que os valores de S são pequenos, na ordem de 0,038 a 0,093 %. Os E_p com nível de confiança de 90 % estão entre 0,038 e 0,089 %. Utilizando um nível de confiança de 95 % os E_p variam de 0,048 a 0,117 %, e para um nível de confiança de 98 % variam entre 0,064 e 0,157 %. Estes valores de E_p mostra uma confiabilidade alta nas medições no simulador pelo método *indoor*. Através dessas três médias das I_{SC} de cada tecnologia, foi calculado uma nova média, desvio padrão médio e o erro padrão (E_p) com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada tecnologia, sendo que os resultados estão apresentados na Tab. 2.

	I_{SC} (1000 W/m ²)	
	mon-Si	pol-Si
\bar{x}	7.829733	7.534403
S	0.059895	0.037343
E_p (90%)	0.100974	0.062955
E_p (95%)	0.148709	0.092772
E_p (98%)	0.240852	0.150165

Tabela 2: \bar{x} , S e E_p (90, 95 e 98%) das I_{SC} de cada tecnologia.

Analisando a Tab. 2, pode-se identificar que o S da média da I_{SC} de cada tecnologia é de 0,7649 % para o mon-Si e 0,4956 % para pol-Si. Esses valores de S são relativamente pequenos e mostra uma boa repetibilidade na construção dos protótipos. O E_p com os níveis de confiabilidade de 90, 95 e 98 % foram determinados, chegando em valores de 1,289 a 3,070 % para mon-Si e de 0,835 a 1,993 % para pol-Si.

O parâmetro elétrico que representa a qualidade de um módulo fotovoltaico é chamado de fator de forma (FF). Foi realizado a mesma análise da I_{SC} para o FF . Foi calculado a \bar{x} , S e E_p com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada protótipo, apresentado na Tab. 3.

	FF					
	PROT 1	PROT 2	PROT 3	PROT 4	PROT 5	PROT 6
\bar{x}	68,00	68,60	69,92	69,62	68,27	68,34
S	0,089443	0,260768	0,258843	0,785917	0,081649	0,194935
E_p (90%)	0,073577	0,214513	0,246796	0,646511	0,067166	0,185863
E_p (95%)	0,093879	0,273703	0,321345	0,824904	0,085700	0,242006
E_p (98%)	0,122872	0,358231	0,433746	1,079658	0,112166	0,326655

Tabela 3: Médias, desvios padrão e erros padrão dos FF das seis medições de cada protótipo.

Observando a Tab. 3 percebe-se que os valores de S são pequenos, na ordem de 0,081649 a 0,785917 %. Os E_p com nível de confiança de 90 % estão entre 0,067166 e 0,646511 %. Utilizando um nível de confiança de 95 % os E_p variam de 0,085700 a 0,824904 %, e para um nível de confiança de 98 %

variam entre 0,112166 e 1,079658 %. Estes valores de E_p mostra uma confiabilidade alta no processo construtivo das células de referência, mantendo um fator de forma próximo de um protótipo comparado com outro.

Através das três médias dos FF de cada tecnologia foi novamente calculado uma nova média, desvio padrão e o erro padrão (E_p) com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada tecnologia, os resultados estão apresentados na Tab. 4.

	FF	
	mon-Si	pol-Si
\bar{x}	68,84	68,74
S	0.982	0.760
E_p (90%)	1,655	1,281
E_p (95%)	2,439	1,888
E_p (98%)	3,948	3,056

Tabela 4: Médias, desvios padrão e erros padrão dos FF de cada tecnologia.

A média foi de 68,84 % para mono-Si e 68,74 % para poli-Si. O desvio padrão médio foi de 0,982 para mono-Si e 0,760 para poli-Si. Podemos observar novamente que o valor do desvio padrão é relativamente pequeno entre as duas tecnologias. Pode-se concluir que o desenvolvimento das células de referência foi eficaz e repetitivo. Os valores de FF permaneceram perto dos 70 %, valor ideal para um módulo obter o certificado de boa qualidade.

CONCLUSÃO

A utilização de medidores de irradiância em plantas fotovoltaicas é de grande importância para a confiabilidade do sistema, trazendo uma medição da irradiação mais efetiva considerando as variações espaciais que ocorre na área da usina fotovoltaica. Este trabalho apresentou a descrição do processo de desenvolvimento de protótipos de células de referência. Para a construção dos protótipos, foram usados equipamentos do Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Os ensaios elétricos dos protótipos foram realizados no simulador solar (*indoor*) do Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. As curvas I-V atingiram valores satisfatórios e esperados levando em consideração o método de construção dos protótipos. O desvio padrão é relativamente pequeno levando em consideração as duas tecnologias, mostrando que o desenvolvimento das células de referencia foram repetitivas e de maneira eficaz.

REFERENCIAS

- Bülher, A. J. (2011). Estudo de técnicas de determinação experimental e pós processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos, Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre.
- Bharadwaj, P.; John, V. (2014). Design, Fabrication and Evaluation of Solar Irradiation Meter. IEEE International Conference on Power Electronics, drives and energy systems systems (Pedes).
- Carrillo, J. M. *et al.* (2017). Uncertainties on the outdoor characterization of PV modules and the calibration of Reference modules. Solar Energy. 155 (2017) 880-892.
- Dalmagro, P. S. e Krenzinger, A. (2013). Análise de Simuladores Solares para Ensaio de Módulos Fotovoltaicos, In: salãoufrgs, sic - XXV salão de iniciação científica da ufrgs, Porto Alegre.

- Duffie J. A. e Beckman W. A. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes, 3ª edição, pp. 926. Wiley Interscience, New York.
- Galdino, A. M. e Silva, C. P. (2014). Subsídios para identificação visual de problemas em células e módulos fotovoltaicos. Revista Brasileira de Energia Solar, Volume V, Número 2, pp. 159-170.
- García, M.; Marroyo, L.; Lorenzo, E.; Marcos, J.; Pérez, M. (2015). Solar irradiation and PV module temperature dispersion at a large-scale PV plant. Progress in Photovoltaics, Vol. 23, pp. 1381-1389.
- Gasparin, F. P. (2009). Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado.
- Macagnan, M. H. (2010). Introdução a Radiação Solar. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo.
- Macêdo, W. N. (2006). Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Mocelin, A. R. (2014). Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Pereira, E. B. *et al.* (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição, pp. 88. São José dos Campos.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro.

ABSTRACT

The measurement of solar radiation is important for the development of systems for converting solar energy into other types of energy. The instrument used to measure solar radiation is the pyranometer. These devices measure global solar radiation and can be of two types: thermoelectric pyranometer and photovoltaic pyranometer. Photovoltaic pyranometers are commonly used to measure solar radiation. The advantage of photovoltaic pyranometers is their low cost, the identical spectral response of a photovoltaic module and the response time practically instantaneous, in the order of 10 μ s, and linear with solar irradiance. This article presents the electrical assays of reference cell prototypes developed at the Applied Research Laboratory (LPA) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). The developed prototypes underwent the lamination process to encapsulate the cells. The I-V curves were obtained in indoor trials. The repeatability of the construction of the prototypes and the measurement of the indoor simulator were analyzed.

Keywords: Solar radiation, reference cells, photovoltaic pyranometer, spectral response, I-V curves.

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA TASA DE CAMBIO A CORTO PLAZO DE LA IRRADIANCIA SOLAR CON APLICACIONES EN ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Elian Wolfram¹, Facundo Orte², Juan Pallotta², Raúl D'Elía³, Claudio Libertelli³, Facundo Carmona⁴, Eduardo Luccini⁵, Nicolás Porello⁶, Joaquín Ubogui⁶
CEILAP-UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Juan Bautista de la Salle 4397, Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina. C.P. B1603ALO; FRBA-UTN; ewolfram@citedef.gob.ar

Recibido 13/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: Las nubes son la principal fuente de variación de la irradiancia solar a escala de tiempos cortos, del orden de minutos. Analizar estas perturbaciones en la irradiancia global horizontal es de gran interés para los sistemas de generación fotovoltaicos, debido a que estos cambios repentinos afectan la calidad de la energía eléctrica que producen y podrían afectar la integración a la red eléctrica. El objetivo de este trabajo es caracterizar las tasas de variación de corto plazo de la irradiancia solar global en un plano horizontal debido a la nubosidad sobre la ciudad de Buenos Aires. Las mediciones de tierra son obtenidas por un piranómetro Kipp&Zonen CMP-21, perteneciente a la red de radiación solar SAVER-Net. Los resultados del análisis muestran que el mayor número de tasas de variación se da en intervalos de 1 minuto. Se observa que durante el año 2017, se presentaron más de 1300 saltos de 300 W/m². La cantidad de días en los cuales se presentó por lo menos una de estas variaciones fue de 146. Por lo tanto, se concluye que casi un 50% del total de días en un año se producen saltos mayores a 300 W/m². Esto afecta la eficiencia y vida útil de los inversores presentes en los sistemas fotovoltaicos.

Palabras clave: irradiancia solar, energía solar fotovoltaica, nubes, ramp-rates.

INTRODUCCION

La generación de energía eléctrica a partir de la tecnología solar fotovoltaica es altamente dependiente de las condiciones meteorológicas. Existen múltiples escalas de movimiento y rangos de tiempo relevantes dentro de los fenómenos que ocurren en la atmósfera. Para la utilización de energías renovables variables como es el caso de la energía fotovoltaica, acopladas a una red eléctrica la escala de tiempo de los fenómenos atmosféricos que son relevantes se encuentran primariamente en el rango de las horas a los días. Esto significa que los procesos atmosféricos críticos que deben considerarse incluyen desde el cambio minuto a minuto del pasaje de las nubes sobre una planta (procesos de microescala), cambios bruscos en la cobertura nubosa asociados con sistemas de tiempo de mesoescala, como ondas frontales o líneas de inestabilidad, y cambios en las características generales de la nubosidad asociados con la escala sinóptica de esquemas de alta y baja presión atmosférica. Debido a que la salida de una planta fotovoltaica está altamente correlacionada con la irradiancia espacial promedio sobre los paneles fotovoltaicos que la componen, las características de variabilidad de la irradiancia serán directamente aplicables a la variabilidad de la salida fotovoltaica, si se toma en cuenta el tamaño de la planta. Los cambios de irradiancia provocan que los niveles de potencia de salida de las plantas fotovoltaicas fluctúen, lo que puede tener implicaciones negativas para la gestión de la red eléctrica. En particular, en determinadas condiciones de cobertura nubosa, es posible

1 Inv. Adj. CONICET/CITEDEF; Inv. Facultad Regional Buenos Aires /UTN

2 Inv. CITEDEF

3. CPA CONICET

4. Inv. Asistente CONICET

5. Inv. Adj. CONICET/CEPROCOR

6. Tecnólogo YPF TECNOLOGIA S.A. (Y-TEC)

encontrar intermitencia en la generación debido a la variabilidad de la irradiancia que impacta sobre el plano de los módulos resultante del movimiento de las nubes (Hoff and Perez, 2010; Kankiewicz et al., 2010; Sayeef et al., 2012). Por otro lado las tasas de variación en tiempos cortos dificultan el acople de la energía inyectada a la red a través de los inversores de los sistemas fotovoltaicos (Yehya et al., 2015; Crook et al., 2011; Sánchez Reinoso et al., 2012). A su vez, afectan la calidad de la energía e incluso pueden provocar inestabilidad en la red (T. Reindl et al., 2017). Así, un área clave de investigación para la mitigación de estos efectos negativos es la predicción confiable de la potencia fotovoltaica a través de la predicción precisa y a corto plazo de la intensidad de la radiación solar que impactará sobre la planta (Lorenz et al., 2014). Lew D. et al., (2010) menciona la necesidad de pronósticos precisos de irradiancia en diferentes horizontes de tiempo (desde sub-horarios hasta décadas) para que la generación de energía solar sea económicamente viable.

Por otro lado, el impacto de las nubes sobre la intensidad de la radiación solar tiene dos efectos contrapuestos. Cuando el disco solar es bloqueado por la nube, la nubosidad generalmente produce un efecto atenuador debido a la reducción de la componente directa de la radiación solar. Esta situación conduce a la reducción del recurso energético solar disponible para la generación de energía fotovoltaica, y en general este tipo de efecto es el más estudiado cuando analizamos el impacto de las nubosidad sobre la radiación solar (Wolfram, et al., 2009; Luccini et al., 2010; Vásquez et al., 2013).

Sin embargo, bajo ciertas condiciones de cobertura nubosa, en presencia de cielos parcialmente cubiertos, las nubes pueden producir el efecto opuesto incrementando los niveles de radiación global en superficie por sobre los valores esperados en condiciones de cielo despejado. Este efecto es conocido como efecto de incremento (enhancement) de la radiación solar global y ha sido analizado para distintas porciones del espectro electromagnético (Visible y UV) (Estupiñán et al., 1996; Orte et al., 2009; Wolfram et al., 2013). Este fenómeno se caracteriza por un incremento rápido e intenso de la radiación solar en superficie cuando el Sol es reflejado por el borde de nubes tipo cúmulos. Generalmente, estos eventos de incremento se producen antes o después de una situación de atenuación, con una diferencia del orden de unos pocos minutos, incrementando las variaciones en la irradiancia solar global en periodos de tiempo corto entre las situaciones con disco solar descubierto y bloqueado, conocidas como variaciones rápidas (ramp-rates) de la irradiancia solar.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la intensidad y la frecuencia de tasas de variación de irradiancia global en corto plazo (1 a 5 minutos) debido a la nubosidad en la ciudad de Buenos Aires. Para ello se analizaron las mediciones de irradiancia solar global medidos con un piranómetro Kipp&Zonen CMP21 perteneciente al nodo de Villa Martelli de la red SAVER-Net (www.saver-net-satreps.org)

MEDICIONES Y METODOLOGÍA

Para estudiar la tasa de cambio de la irradiancia global en distintos intervalos temporales, se analizó la base de datos del nodo de la red SAVER-Net ubicado en la ciudad de Villa Martelli, Buenos Aires para el año 2017. En este nodo se encuentra instalado un piranómetro de banda ancha (300-2800nm) Kipp&Zonen CMP21. Este instrumento está conectado a un adquisidor de datos marca Campbell CR1000, configurado para adquirir el valor de irradiancia promedio cada 1 minuto, promedio de mediciones instantáneas (alrededor de una por segundo) que el instrumento más el adquisidor obtienen durante el minuto transcurrido. Las mediciones que conforman la base de datos utilizada para este estudio comprenden ángulos cenitales menores a 85°, para el año 2017. Los instrumentos de la red SAVER-Net de radiación solar operada en conjunto con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuentan con la limpieza diaria y tienen control de temperatura. Hasta el momento, los piranómetros de la red SAVER-Net no hay sido sometidos a calibraciones extras, y los datos radiométricos son obtenidos a partir de las constantes de sensibilidad aportadas por la fábrica. Los instrumentos instalados en el nodo Villa Martelli, son sometidos a los mismos controles y mantenimientos rutinarios que impone el SMN al resto de las estaciones. Detalles del procedimiento de mantenimiento rutinario pueden encontrarse Barbero et al, 2017.

La alta resolución temporal de adquisición permite observar la variación de la irradiancia en superficie a corto plazo. Las tasas de variación para intervalos de un minuto son calculadas haciendo la

diferencia entre mediciones sucesivas. Para intervalos de tiempo mayores, las mediciones minutales de irradiancia global registradas son promediadas en la ventana de tiempo Δt definida (2 a 5 minutos) y luego se calcula la diferencia entre promedios sucesivos. Con el objetivo de caracterizar las variaciones a corto plazo de la irradiancia solar horizontal en Buenos Aires debido a la nubosidad, se analiza la frecuencia de ocurrencia de diferentes tasas de cambio para diferentes ventanas de tiempo, a través de histogramas y se cuantifican los días que se presenta al menos un salto de irradiancia global. Cuando incrementamos la ventana de tiempo Δt se degrada la resolución temporal obteniendo menor cantidad de intervalos (la muestra a analizar disminuye). Con el objetivo de comparar la ocurrencia de casos de ramprates entre ventanas temporales, también se analiza la frecuencia relativa de ocurrencia la cual es independiente del tamaño de la muestra.

RESULTADOS

En la figura 1 (curva azul) se observa un ejemplo de la medición de irradiancia global observada por el piranómetro para el día 25 de noviembre de 2017 y la irradiancia modelada calculada con el modelo Global C Iqbal (curva roja) (Iqbal, 1983), para una situación de cielo despejado (izquierda). El modelo Global C tiene como parámetros de entrada, además de la fecha y la posición geográfica que permiten determinar la posición del sol a lo largo del año, variables de composición como el contenido total de ozono y contenido total de aerosoles, temperatura y presión atmosféricas a nivel del suelo y características ópticas de la atmósfera como el albedo del suelo, el espesor óptico de aerosoles, el exponente de Angstrom y el albedo de dispersión simple (single scattering albedo). Debido a que en el presente trabajo, el modelo paramétrico solo es utilizado con fines comparativos de la variabilidad que producen las nubes con respecto a situaciones de cielos claros, las simulaciones se realizaron tomando valores medios anuales de ozono, espesor óptico de aerosoles y albedo de dispersión simple de los aerosoles y albedo del suelo para Buenos Aires, y solo se varió la fecha y la hora de entrada al modelo. Se observa que el modelo se corresponde con las mediciones en situaciones de cielo despejado. La diferencia entre los valores medidos y modelados en horas cercadas a la salida del sol para este día, se deben a la obstrucción de los edificios que se encuentran hacia el SE del piranómetro, bloqueando por unos minutos la componente directa del sol en esta época del año.

A la derecha se presenta la irradiancia medida en presencia de nubes para el día 17 de diciembre de 2017 y la obtenida por el modelo para cielo despejado. En este caso, se observa que el efecto de las nubes sobre la irradiancia puede ser de atenuación o de incremento respecto a la que se esperaría para un día de cielo despejado. La atenuación se presenta cuando la nube oscurece la componente directa de la radiación proveniente del sol (medición por debajo del modelo), mientras que situaciones de incremento se presentan por la presencia de nubes quebradas en el cielo, cuando la componente directa no es obstruida y la reflexión de la radiación solar en el borde de la nube incrementa la componente difusa, produciendo una irradiancia en superficie mayor a la que se esperaría en una situación de cielo despejado (medición por encima del modelo).

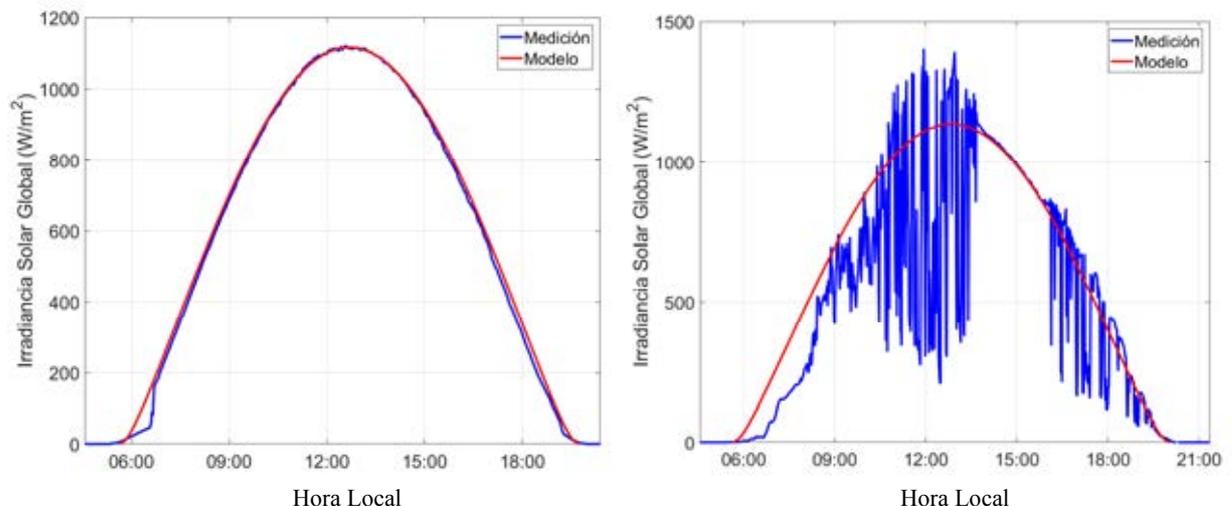


Figura 1: Irradiancia solar global en plano horizontal, medida (azul) y modelada (roja) para un día despejado (Izquierdo) y para un día con nubes dispersas (azul).

Como se observa en la figura 1, estas situaciones sucesivas de atenuación y/o incremento, conducen a saltos de irradiancia significativos en periodos cortos de tiempo (intermitencia).

La figura 2 presenta la irradiancia solar en superficie para el mismo día (17/12/2017) entre las 12 y las 13 horas y las imágenes de la cámara de observación de cielo SONA (Modelo 201D) instalada en el mismo sitio, donde se observa la condición de nubosidad presente para tres minutos consecutivos (12:19, 12:20, 12:21 horas). La presencia de nubes tipo cumulus disperso explica la intermitencia que se presenta en la irradiancia global durante ese día.

A modo de ejemplo, se analizan dos situaciones de variaciones rápidas producidas con diferencias de un minuto (Δt), donde la irradiancia solar horizontal sufrió aumentos drásticos respecto al valor del minuto anterior, como consecuencia del paso de la nube. En las imágenes observadas por la cámara de observación cielo se muestra la situación de la nubosidad para cada minuto analizado. Cuando las nubes ocultan la irradiancia solar directa (12:19 hs., punto a) se produce la atenuación, con un valor de irradiancia (I) de 463 W/m², seguido por una situación de incremento de la radiación en el minuto siguiente (12:20 hs., punto b), alcanzando los 1326 W/m². Por lo tanto, el aumento de la irradiancia global para este caso fue de alrededor de 200% respecto del minuto anterior ($\Delta I_1=863$ W/m²). Si comparamos con el valor modelado, se observa un incremento del 18% respecto de una situación con cielo despejado. En el minuto siguiente (12:21, punto c), se observa que la nube vuelve a bloquear la radiación solar directa y la irradiancia vuelve a caer hasta 944 W/m². Un segundo ejemplo se observa entre el minuto 12:29 y 12:30 ($\Delta t_2=1$ minuto), donde se produce un aumento de $\Delta I_2=757$ W/m².

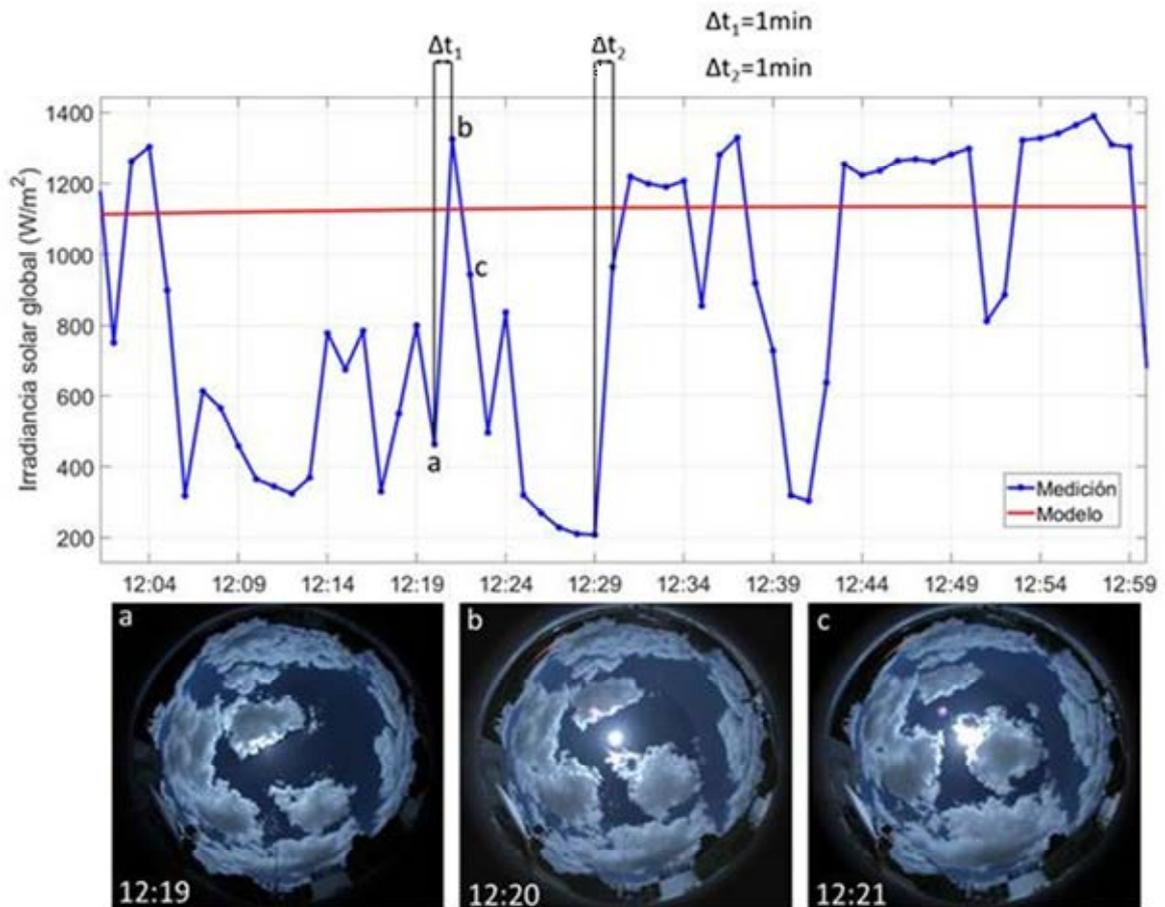


Figura 2: Panel superior: Irradiancia solar global en plano horizontal, medida (azul) y modelada para cielo despejado (roja) entre las 12 y las 13 hora local. (1 dato por minuto). Panel inferior: Secuencia de imágenes del cielo de la cámara SONA 201D que corresponden al punto a, b y c.

Con el objetivo de caracterizar estas variaciones a corto plazo de la irradiancia en Buenos Aires debido a la nubosidad, se analizó la frecuencia de ocurrencia de las tasas de cambio de la irradiancia global superficial para diferentes ventanas de tiempo, a través de los histogramas de la figura 3. El eje

X define las categorías de tasas de cambio mayores a un umbral en W/m^2 , mientras que en el eje Y se presenta la frecuencia para cada una de las categorías. Los diferentes histogramas corresponden a diferentes ventanas temporales analizadas. La disminución de la frecuencia con el aumento de categoría para cada histograma se presenta en proporciones similares entre los diferentes histogramas.

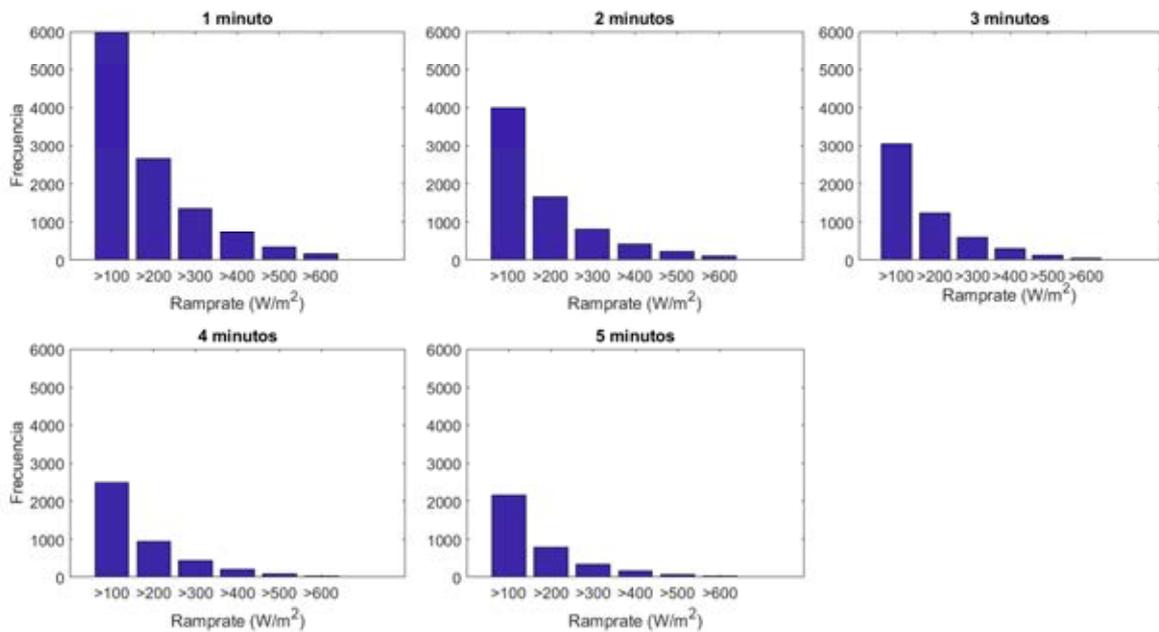


Figura 3. Histogramas de frecuencia de ocurrencia de ramp-rate para el año 2017 en el nodo Villa Martelli de la red SAVER-Net

Como es de esperar, cuando comparamos los histogramas para ventanas temporales diferentes, se observa que la frecuencia de ramp-rates de todas las categorías disminuye a medida que se incrementa la ventana temporal, dado que la muestra total (cantidad de intervalos totales) también decrece. Pero si observamos la frecuencia relativa de ramprates (figura 4), se presenta un aumento para ventanas temporales mayores.

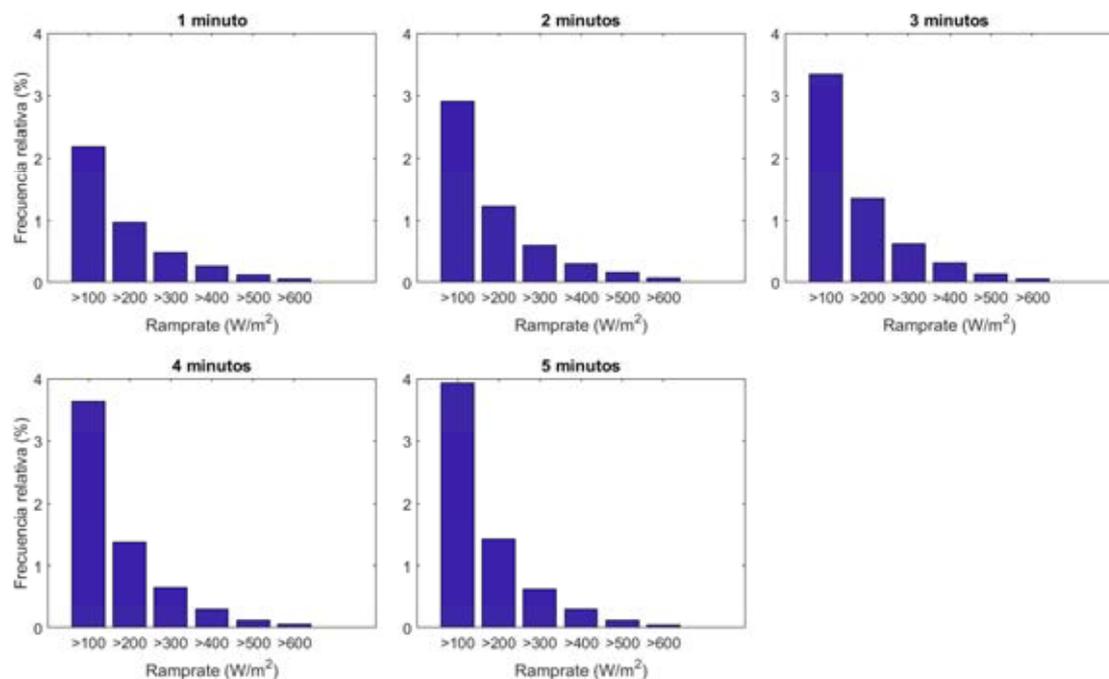


Figura 4. Histogramas de frecuencia relativa de ocurrencia de ramp-rate para el año 2017 en el nodo Villa Martelli de la red SAVER-Net.

Finalmente, en la Tabla 1 se resume la frecuencia de los ramp-rate y se cuantifican la cantidad de días en los que se presentó, como mínimo, un ramp-rate determinado en el año 2017. Se observa que la cantidad de días en los que se presentan al menos 1 ramp-rate mayor a 100 W/m^2 con un Δt de un minuto fue mayor a 250. Por lo tanto, en una proporción mayor al 70% del total de días anuales se presenta al menos un ramp-rate de 100 W/m^2 . Si analizamos la categoría de tasas de variación mayores a 400 W/m^2 , se observa una disminución del número de días con el aumento de la ventana temporal, siendo de 107 días para 1 minuto ($\sim 30\%$ del total de días anuales) y 64 días considerando una ventana de 5 minutos ($\sim 18\%$ del total de días anuales).

Analizando las frecuencias relativas entre ventanas temporales se observa que aumentan el porcentaje de ramprates cuando se incrementa Δt para tasas de cambio >100 y >200 . Para las categorías de tasas de cambio mayores no se observa un incremento sostenido en la frecuencia relativa con el aumento de Δt , sino que se mantiene casi constante.

TC (W/m^2)	1 min			2 min			3 min			4 min			5 min		
	FA	ND	FR (%)	RR	ND	FR (%)									
> 100	5988	255	2,19	3992	267	2,91	3064	264	3,35	2505	269	3,65	2159	266	3,93
> 200	2664	196	0,97	1667	188	1,22	1234	183	1,35	942	180	1,37	786	176	1,43
> 300	1342	146	0,49	824	133	0,60	580	121	0,63	448	125	0,65	349	106	0,64
> 400	711	107	0,26	413	95	0,30	288	81	0,31	208	71	0,30	164	64	0,30
> 500	345	69	0,13	216	62	0,16	125	44	0,14	81	41	0,12	67	38	0,12
> 600	160	36	0,06	99	33	0,07	52	24	0,06	36	23	0,05	24	18	0,04

Tabla 1. Frecuencia absoluta (FA) y frecuencia relativa (FR) de ocurrencia de ramp-rate en las tasas de cambio (TC). Número de días (ND) en los cuales hubo al menos un ramp-rate durante el año 2017.

Cabe mencionar que este estudio de las variación rápidas que producen las nubes en movimiento en escalas temporales del orden de minutos es un estudio del “peor caso” ya que se realizan mediciones puntuales en el espacio y una planta fotovoltaica de potencia media tiene una cobertura espacial de algunas hectáreas, lo que filtra hasta cierto grado las fluctuaciones en la generación, principalmente las de muy corto plazo. Este efecto fue estudiado en el trabajo de Kankiewicz et al, (2010), donde se analizó la generación de diferentes porciones espaciales de una misma planta de 25 MW subdividida en contenedores o subconjuntos de paneles que alimentan la subestación. En el trabajo se evidencia, que las fluctuaciones en la generación son más importantes cuando la cobertura espacial de los containers o conjunto de ellos es más pequeño, mientras que las fluctuaciones sobre toda la planta son menores.

CONCLUSIONES

A través de este estudio se logró cuantificar la frecuencia de tasas de variación de irradiancia global solar en superficie para la ciudad de Buenos Aires durante el año 2017, en diferentes ventanas temporales (1 a 5 minutos). Además, se cuantificaron los días en los cuales se produjo al menos un ramp-rate. Se observa que se presentaron más de 1300 saltos de 300 W/m^2 dentro del período de estudio. Se contabilizaron 145 días en los cuales se presentó por lo menos una de estas variaciones. Por lo tanto, para áreas ubicadas en Buenos Aires o en las cercanías, se concluye hay un 50% de días por año en los que se producen saltos mayores a 300 W/m^2 que podrían afectar la eficiencia de las centrales fotovoltaicas que se instalen en esta zona del país, pudiendo afectar la integración de la energía generada en la red interconectada.

Este tipo de estudio aporta información útil para la evaluación de mecanismos de mitigación de la intermitencia en la generación basados en el pronóstico de la irradiancia solar en escalas temporales cortas, del orden de minutos, y brinda una idea de frecuencia de ocurrencia y orden de magnitud de las variaciones de irradiancia sobre Buenos.

Se planea extender este estudio al resto de las estaciones de la red SAVER-Net y ampliar la serie temporal analizada, que permitirán caracterizar las tasas de variaciones de la irradiancia solar en corto

plazo para otras regiones del país, donde la morfogénesis de las nubes propias de regiones climáticas diversas, pueda afectar este tipo de variaciones rápidas.

REFERENCIAS

- Barbero, A., D'Elía, R., Wolfram, E. y Sánchez, R., 2017: Sensores de radiación : UVA, UVB y Piranómetro - Mantenimiento. Nota Técnica SMN 2017-20.
- Crook J., Jones L., Forste P., Crook R. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy Environ. Sci.*, 4, 3101-3109
- Estupiñan, J.G., Raman, S., Grescenti, G.H., Streicher, J.J., Barnard, W.F., 1996. Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *J. Geophys. Res.* 101, 16807–16816.6.
- Hoff, T.E., Perez, R. 2010. “Quantifying PV power Output Variability.” *Solar Energy* 84 (2010) 1782-1793.
- Kankiewicz J. Adam, Clean Power Research, Seattle, WA; and M. Sengupta and D. Moon, Proc. ASES National Solar, 2010haze on UV-B radiation. *J. of Geophys. Res.*, vol.101, no.D11, pp.16807-16816.
- Lew D., Miller N., Clark K., Jordan G., Gao Z. (2010). Impact of High Solar Penetration in the Western Interconnection, NREL Technical Report (NREL/TP-5500-49667).
- Lorenz E., Kühnert J., Heinemann D. (2014). Overview of irradiance and photovoltaic power prediction, in *Weather Matters for Energy*. Springer, New York, pp. 429–454
- Luccini E., Rivas M., Rojas E., Piacentini R., Canziani P. (2010). Parámetros ópticos de nubes en un sitio costero del desierto de Atacama, Chile, a partir de mediciones piranométricas de irradiancia solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 14, 11.29-11.34, 2010.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic. Press, Toronto
- Orte F., Wolfram E., Salvador J., D'Elia R., Marinelli C., Quel E. (2009). Estudio de la Influencia de las Nubes sobre la Radiación UV en la Ciudad de Río Gallegos. *Anales AFA*, vol. 21, pp. 251-254, Rosario, Argentina.
- Reindl T., Walsh W., Yanqin Z., Bieri M. (2017). Energy meteorology for accurate forecasting of PV power output on different time horizons. *SERIS*, Singapore, NUS, 7 Eng. Drive, 117574.
- Sánchez Reinoso C. R., Milone D. H. y Buitrago R. H. (2012). Simulation of photovoltaic centrals under dynamic shading, *Applied Energy*, Elsevier Science. ISSN: 0306-2619.
- Sayeeff S., Heslop S., Cornforth D., Moore T., Percy S., Ward J., Berry A., Rowe D. (2012). Solar intermittency: Australia's clean energy challenge: characterising the effect of high penetration solar intermittency on Australian electricity networks. CSIRO, Sydney, Australia.
- Schmidt, T., Calais, M., Roy, E., Burton, A., Heinemann, D., Kilper, T., and Carter, C. (2017): Short-term solar forecasting based on sky images to enable higher PV generation in remote electricity networks, *Renew. Energy Environ. Sustain.* 2, 23. (DOI: 10.1051/rees/2017028)
- Vásquez P., Wolfram E., Salvador J., Masi S., Repetto C., Orte F., D'Elia R. y Quel E. (2013). Estudio de la variación estacional de la radiación Solar global visible y el impacto de la cobertura nubosa en Buenos Aires. *Contaminación atmosférica e hídrica en Argentina: contribuciones de la IV Reunión Anual PROIMCA y II Reunión Anual PRODECA*. ISBN 978-950-42-0150-2; pp 614-622.
- Wolfram E., Salvador J., D'Elia R., Quel E. (2009). UV ground based measurements in Río Gallegos, Argentina. *Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS)*, p.1100351-354.
- Wolfram E., Salvador J., Orte F., Bulnes D., D'Elia R., Antón M., Alados-Arboledas L. y Quel E. (2013). Study Of Cloud Enhanced Surface UV Radiation At OAPA, Río Gallegos, Argentina. *AIP C. Proceedings*. Melville, New York, vol.1531 n°. p907 - 910.

Yehya A., Ahmed A., Iyad M., Ali A. (2015). Cloud Effect on Power Generation of Grid Connected Small PV Systems. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:9, No:9.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto SAVER-Net fue financiado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y la Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón (JST). Los autores desean agradecer a JICA y JST. Los autores agradecen los valiosos aportes de los revisores, que lograron mejorar la claridad y calidad del presente artículo.

ABSTRACT The clouds are the main source of variation of solar irradiance on a short time scale, of the order of minutes. Analyzing these disturbances in horizontal global irradiance is of great interest for photovoltaic generation systems, because these sudden changes affect the quality of the electrical energy they produce and their capacity factor. The objective of this work is to characterize the short term variation rates of the global solar irradiance in a horizontal plane due to the cloudiness over the city of Buenos Aires. Earth measurements are obtained by a Kipp & Zonen CMP-21 pyranometer, belonging to the SAVER-Net solar radiation network. The results of the analysis show that the greatest number of variation rates occurs in 1-minute intervals. It is observed that during the year 2017, more than 1300 jumps of 300 W / m² were presented. The number of days in which at least one of these variations occurred was 146. Therefore, it is concluded that almost 50% of the total of days in a year produce jumps greater than 300 W / m². This affects the efficiency and useful life of the investors present in photovoltaic systems.

Keywords: Solar Irradiance, Solar Photovoltaic Energy, clouds, ramp rate

RADIACIÓN UV ERITÉMICA EN LA PUNA: ESTUDIO ESTADÍSTICO DIARIO Y HORARIO PARA UN AÑO TÍPICO

H.Suárez^{1,2}, D.Acosta¹, C.Cadena^{1,2} y G.Suárez¹.

¹UNSa, Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta Capital, Argentina.

²INENCO, Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta Capital, Argentina.

Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas — UNSa C.P. 4400 – Salta

Tel. 087-4255389- e-mail: galosuárezh@gmail.com.ar

Recibido 16/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: Se desarrolló un año típico de la radiación solar UV Eritémica (UVER) para la localidad de Tolar Grande, ubicada en la región de Puna de la provincia de Salta (lat:-24,59; long:-67,40 y 3560 m.s.n.m). Se lo analizó mediante distintos índices estadísticos: percentiles, media, desviación estándar, sesgo, curtosis y otros. El análisis se realizó para dosis diarias/horarias de radiación UVER y para valores instantáneos promedios horarios. Se trabajó con datos de todo tipo de cielos (CT) y luego se los dividió en tres categorías: cielos claros (CC), parcialmente nublados o seminublados (CS) y nublados (CN). Se comprobó el carácter predominante del tipo de cielo durante cada mes. Se realizaron gráficos para informar sobre el índice ultravioleta (IUV) y las dosis eritémicas horarias y diarias recibidas en la región de Puna según la condición del cielo.

Palabras clave: Radiación solar, índice UV, eritema, dosis de radiación, Tolar Grande.

INTRODUCCIÓN

El Noroeste argentino posee regiones cuya altura sobre el nivel del mar supera los 3500 m, allí el clima crea condiciones para que la radiación solar global y eritémica presenten valores altos; debido a la baja atenuación atmosférica (efecto de altura) y la baja nubosidad (efecto del clima). Esta irradiación elevada está presente a lo largo de casi todo el año (Blumthaler et al., 1997). En la región de Puna el polvo es apreciable debido a los frecuentes vientos y la reflexión se incrementa debido a la salinidad del suelo y a la casi inexistente vegetación.

Debido a los efectos nocivos de la radiación UV resulta de interés caracterizar su distribución temporal en distintas regiones. Los daños provocados en la piel por la radiación UV son acumulativos y proporcionales al tiempo de exposición (WHO, 2002). Por ello, se busca desarrollar herramientas que sirvan, de antemano, para conocer las características de la radiación UVER. Con este fin se trata de generar el año típico de la radiación UVER diaria y horaria en Tolar Grande, que por su emplazamiento es representativo de la zona de Puna.

La irradiancia biológica efectiva real se mide en W/m^2 o como *IUV*. Los valores medidos de *IUV* permiten calificar el nivel de riesgo solar. Las categorías de riesgo solar y su escala de colores son recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés). Se denomina Dosis Eritémica Mínima (MED) a la acumulación de radiación que produce la respuesta biológica de formación del eritema por exposición a la UVER (Madronich y Flocke, 1997). Los diferentes individuos no presentan la misma sensibilidad a la radiación UV debido a la protección propia de la piel por pigmentación melánica (fototipo cutáneo), por eso 1 MED varía entre 200-450 J/m^2 (norma DIN 50-50).

CLIMA DE LA PUNA

En general, el clima en la Puna es de montaña, frío y seco. Tiene elevada sequedad atmosférica, es algo cálido de día y bastante frío de noche. Suele presentar precipitaciones estivales de lluvia y nieve desde diciembre a abril. Especialmente en enero y febrero, debido al fenómeno llamado “invierno andino”, que determina un clima húmedo en esta época. La Puna está sujeta por cadenas montañosas y volcanes andinos que se elevan a más de 6000 msnm, con cuencas endorreicas que han originado numerosos salares. Las escasas precipitaciones que caen en esta región varían entre los 0 a 200 mm, convirtiéndola en el lugar más seco de Argentina.

El “invierno andino” es la época de mayor pluviosidad. Se da entre los meses de diciembre y marzo. Las precipitaciones en esta estación se originan como lluvias orográficas causadas por masas de aire provenientes de la región del Amazonas durante la estación lluviosa. Estas se producen en el altiplano debido a actividad convectiva, que es la precipitación que se asocia a la formación de nubosidad cumuliforme durante la tarde, cuando el calentamiento del suelo favorece el desarrollo de movimientos ascendentes y produce precipitaciones en este lugar (Cede et. al., 2002)

ESTACIÓN RADIOMÉTRICA TOLAR GRANDE

Las medidas radiométricas utilizadas en este trabajo se han realizado en la estación radiométrica Tolar Grande, situada geográficamente a una latitud de 24,59° S y longitud de 67,40° W y a una altura de 3560 m.s.n.m. El edificio donde está montada pertenece al municipio de Tolar Grande. No tiene problemas de sombreado debido a la escasa vegetación local. Los datos de radiación UVER se midieron y registraron mediante radiómetros UV-S-E-T de Kipp & Zonen y dataloggers CR1000 de la firma Campbell Scientific. El equipo CR1000 es un instrumento robusto y versátil que está formado por un módulo de control y un panel de conexiones. La memoria RAM de 128 K almacena hasta 62000 valores, protegidos por una pila de litio que permite el registro continuo de datos. La adquisición de datos se realiza cada minuto (Suárez et al, 2013).

EL AÑO TÍPICO DE IRRADIACIÓN UVER

Generalidades

Un año típico en meteorología es un conjunto estándar de datos correspondientes a variables meteorológicas que permiten establecer una referencia de la evolución de tales variables en una región determinada a lo largo de un año. El fin de un año típico consiste en aproximar el comportamiento climático de una región mediante la observación durante N años de un comportamiento anual repetido N veces (Franco, 2002). El resultado ofrece información sobre las características propias del lugar en función de la época del año. La creación de un año típico de la radiación UVER permitirá conocer las características propias de la región de Puna en cuanto a radiación UVER, y por tanto de las medidas de protección en esta región para prevenir enfermedades de la piel dependiendo de la fecha y la hora. Al reconstruir una serie de datos de radiación UVER, se puede estudiar la cantidad de radiación recibida por una persona a lo largo de su vida y proporcionar datos estimados de radiación UVER en lugares donde no se realizan medidas.

Metodología

Un año típico puede construirse para distintos intervalos temporales (días, meses...). En este trabajo se ha creado el año típico de la radiación UVER horaria en función del mes. En este caso, el punto de partida es suponer que todos los datos obtenidos para la misma hora del mes, independientemente del año (por ejemplo julio 2014, julio 2015 y julio 2016), son valores de esa hora, en ese mes en el año típico. De esta manera se tiene la distribución mensual de datos del año típico. Este ha sido sometido a un análisis estadístico para conocer las características regionales más importantes.

Este análisis también se extendió a tres años típicos obtenidos mediante el desglose del año típico inicial según sus condiciones de cielo: claro, parcialmente nublado y nublado. Para clasificar los datos según su condición de cielo se ha utilizado el índice de claridad y los criterios de la tabla 1.

<i>Criterio</i>	<i>Condición de cielo</i>
$k_d \geq 0,70$	Día de cielo claro
$0,34 \leq k_d < 0,70$	Día de cielo seminublado
$0 < k_d < 0,34$	Día de cielo nublado
$k_h \geq 0,75$	Hora de cielo claro
$0,34 \leq k_h < 0,75$	Hora de cielo seminublado
$0 < k_h < 0,34$	Hora de cielo nublado

Tabla 1: Condición de cielo en función del índice de claridad diario y horario, k_d y k_h .

Para poder realizar el año típico debe asegurarse que las variables, dosis diaria, horaria e irradiancia UVER, muestran un ciclo anual y que los valores interanuales no difieren apreciablemente.

Factibilidad de crear el año típico para dosis diaria y horaria UVER

En la figura 1 puede observarse en la evolución temporal de dosis diarias de irradiación UVER, a lo largo del periodo de medida, un patrón cíclico cuyo periodo corresponde a un año. Por lo tanto se cumple la condición de ciclo anual. Los valores máximos de dosis de irradiación UVER diaria se produjeron en el verano del año 2015. Esto se debe a que los días son más largos y los ángulos cenitales son menores, lo que produce una mayor inclinación sobre la superficie horizontal, incrementando los niveles de radiación. El valor máximo alcanzado fue de $8,87 \text{ KJm}^{-2}$. Los valores mínimos se midieron en invierno del 2016, días más cortos y con mayores ángulos cenitales, alcanzando $1,76 \text{ KJm}^{-2}$.

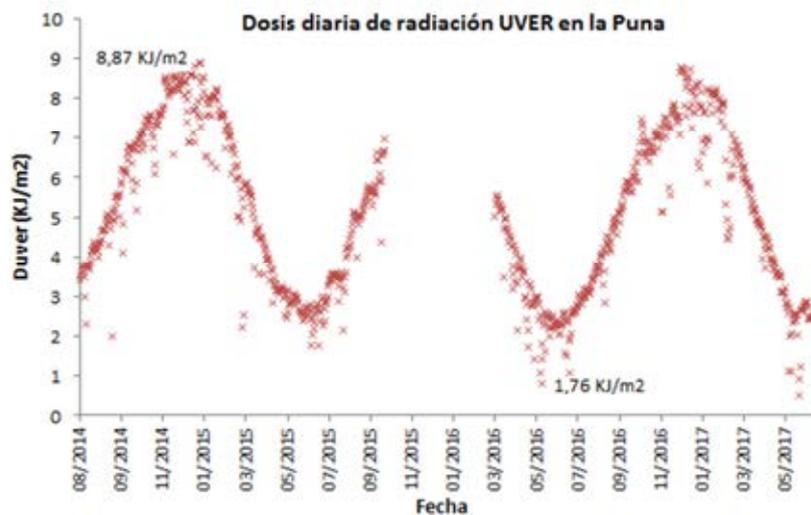


Figura 1: Distribución de dosis diarias de irradiación UVER, la Puna (2014-2017). Entre octubre 2015 y febrero 2016 no se tomaron datos.

Para cuantificar las diferencias interanuales es necesario conocer las anomalías mensuales. Estas se calculan como la diferencia entre el valor medio de un mes dentro de un año y el valor medio de ese mes dentro del año típico. Las figuras 2 (a) y (b) muestran las anomalías de la irradiación UVER diaria y porcentual para todos los cielos, y la figura 3 (a) y (b) para los valores medidos en condiciones de cielo claro.

Los extremos de las anomalías para cualquier condición de cielo son $-11,30 \%$ (marzo 2016) y $10,01 \%$ (junio 2015). Aproximadamente el 94% de las anomalías son inferiores al 10% y el 75% son inferiores al 5% . Realizando el mismo estudio para las anomalías considerando sólo los cielos claros (figura 3), se midieron los extremos de $-14,10 \%$ (marzo 2016) y $6,34 \%$ (junio 2015). El 97% de los valores tiene una variación menor al 10% y el 84% de las anomalías son inferiores al 5% .

Las diferencias entre las anomalías mostradas en la figura 2 son provocadas por cambios en las condiciones de cielo, llegando a variar hasta un 11% el valor típico mensual. Los días claros representan el $80,5 \%$ del total de días, los seminublados el $18,2\%$, mientras que condiciones de cielo

nublado se dan solo en el 1,3% de los casos. Estos resultados garantizan la posibilidad de crear el año típico de irradiación UVER diaria, ya que las anomalías no son grandes. Por lo tanto se consideró factible desarrollar el año típico para irradiación e irradiancia UVER promedio horaria (Franco, 2002).

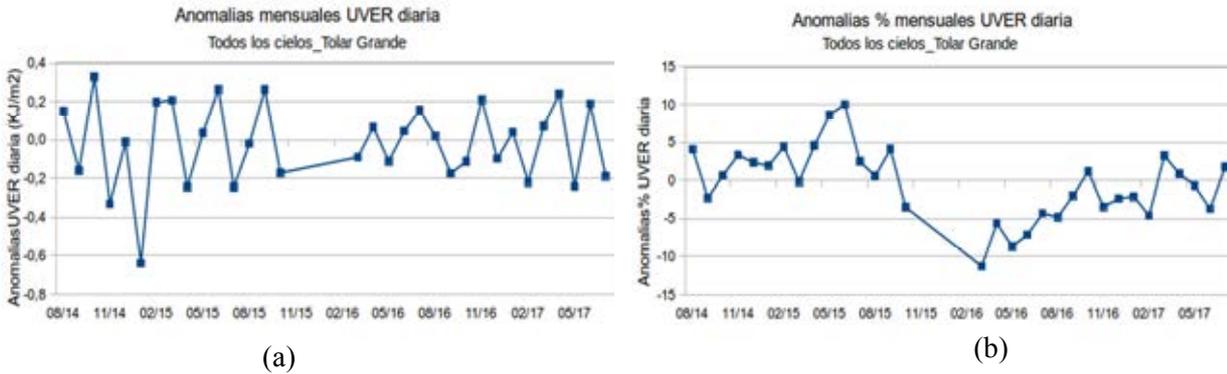


Figura 2: Anomalías mensuales de la irradiación UVER diaria bajo cualquier condición de cielo (a) y porcentuales (b), la Puna (2014-2017).

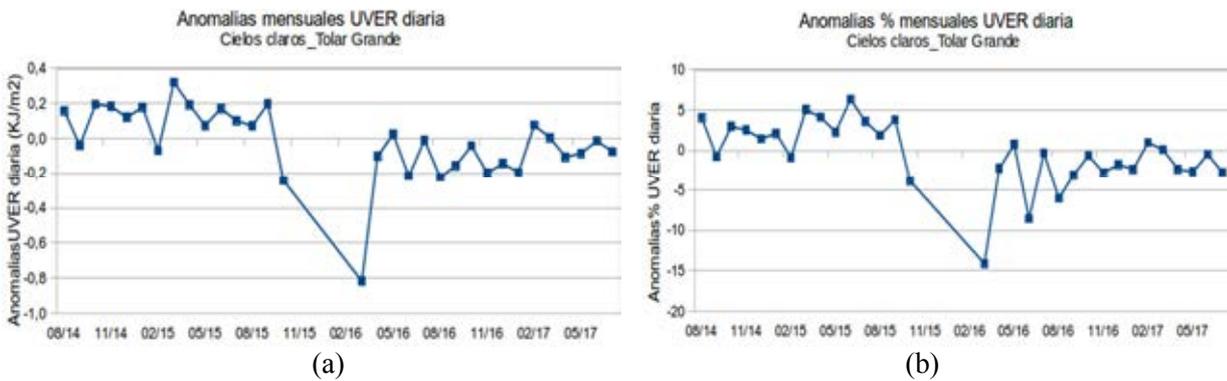


Figura 3: Anomalías mensuales de la irradiación UVER diaria en condiciones de cielo claro (a) y porcentuales (b), la Puna (2014-2017).

Distribución de condiciones de cielo

Para conocer la distribución de cielos claros, seminublados y nublados por mes se ha representado en la figura 4 sus porcentajes de ocurrencia. En general el número de días con cielo claro, para un determinado mes, supera ampliamente al de cielos seminublados y aún más al de nublados.

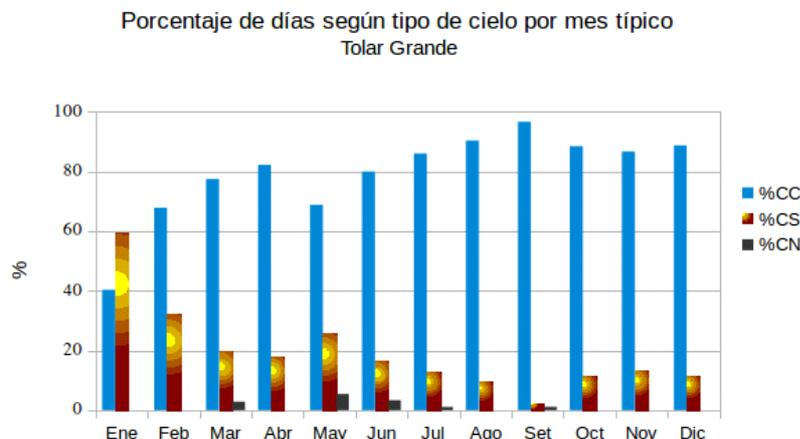


Figura 4: Porcentaje de días según tipo de cielo por mes típico.

La mayor cantidad de días con CC (96,7%) ocurre en setiembre, donde los CS (2,2%) y los CN (1,1%)

son considerablemente menores. Solo en enero, el número de CS (60%) supera a los CC (40%). En ese mes no se observaron ocurrencias de CN (0%). Se midieron CN solo en los meses de marzo, mayo, junio, julio y setiembre aunque con reducidos porcentajes de ocurrencia; el mes donde se observaron más cielos nublados fue mayo (5,4%).

Los meses típicos con menos días seminublados se corresponden con las estaciones de invierno y primavera (junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre y diciembre), con porcentajes inferiores al 17%. Los que superan el 20% son enero, febrero y mayo.

DOSIS UVER DIARIA

Se han calculado los años típicos para los valores de dosis diaria UVER según su condición de cielo. Los valores medios para los distintos meses del año típico se muestran en la figura 5 (a). Los lugares en blanco, para cielos nublados, se deben a la falta de ocurrencia de esas condiciones de cielo durante algunos meses. Estos valores informan de la dosis de radiación UVER diaria que se recibe como promedio, según el tipo de cielo, en la Puna. Así, se sabe que para un día parcialmente nublado de enero, la dosis UVER diaria recibida promedio será de $7,3 \text{ KJm}^{-2}$ y la misma insolación en junio será de $2,2 \text{ KJm}^{-2}$. Las correspondientes para condiciones de cielo claro son $8,4 \text{ kJm}^{-2}$ y $2,6 \text{ kJm}^{-2}$. En la figura 5 (a) se observa una gran correspondencia en las condiciones de CT y CC, esto es debido a la gran proporción de condiciones de cielo claro en cada mes. Solamente en los meses de enero, febrero y mayo estos promedios de dosis eritémicas CT se mantienen inferiores a los de CC.

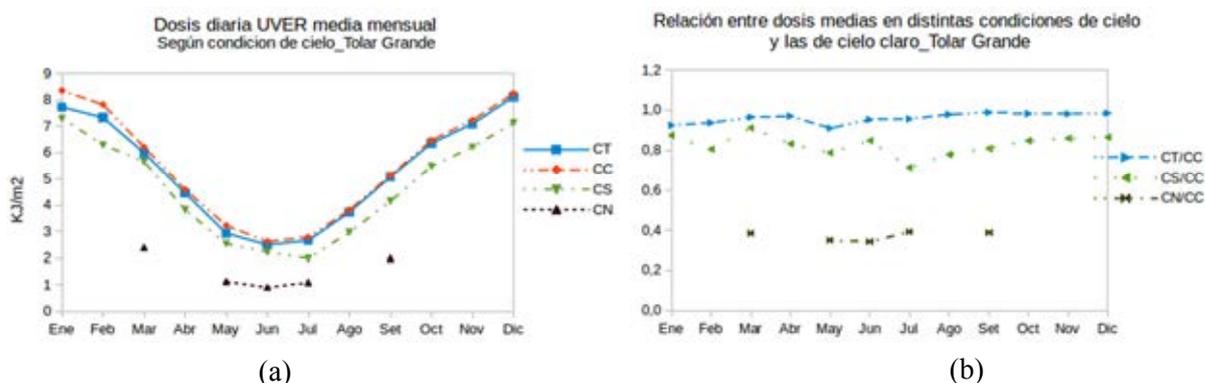


Figura 5: Dosis UVER diaria según condición de cielo en el año típico (a) y relaciones con las dosis de cielo claro (b), la Puna.

La figura 5 (b) muestra la razón entre los valores medios representados en la figura 5 (a). La relación se ha realizado para todos los cielos, parcialmente nublados y nublados; siempre divididos por el promedio de los correspondientes cielos claros. La gráfica informa del carácter medio de cada mes, por ejemplo, se observa que desde junio a diciembre los valores de CT/CC se mantiene cercanos a la unidad, en el mes de mayo disminuye al igual que en enero y febrero. La relación para dosis de cielos seminublados se encuentra entre el 90% y 70%, en cambio para cielos nublados es cercana al 40%.

IRRADIANCIA UVER HORARIA

Conocer la distribución de radiación UVER horaria es muy importante, ya que se puede sustraer información más completa que con la radiación UVER diaria, como conocer las horas de mayor radiación UVER dentro de un mes. Para ello se ha calculado las distribuciones horarias de cada mes del año típico siguiendo los criterios de la tabla 1 para seleccionar las condiciones de cielo.

La distribución de irradiancia UVER se representó por medio de isolíneas, estas se obtienen mediante procesos de interpolación. En la figura 6 se grafican los distintos percentiles de las distribuciones horarias correspondientes a todos los cielos, cielos claros y cielos parcialmente nublados. Se han dibujado líneas de igual irradiancia que representan franjas de espesor $0,03 \text{ Wm}^{-2}$.

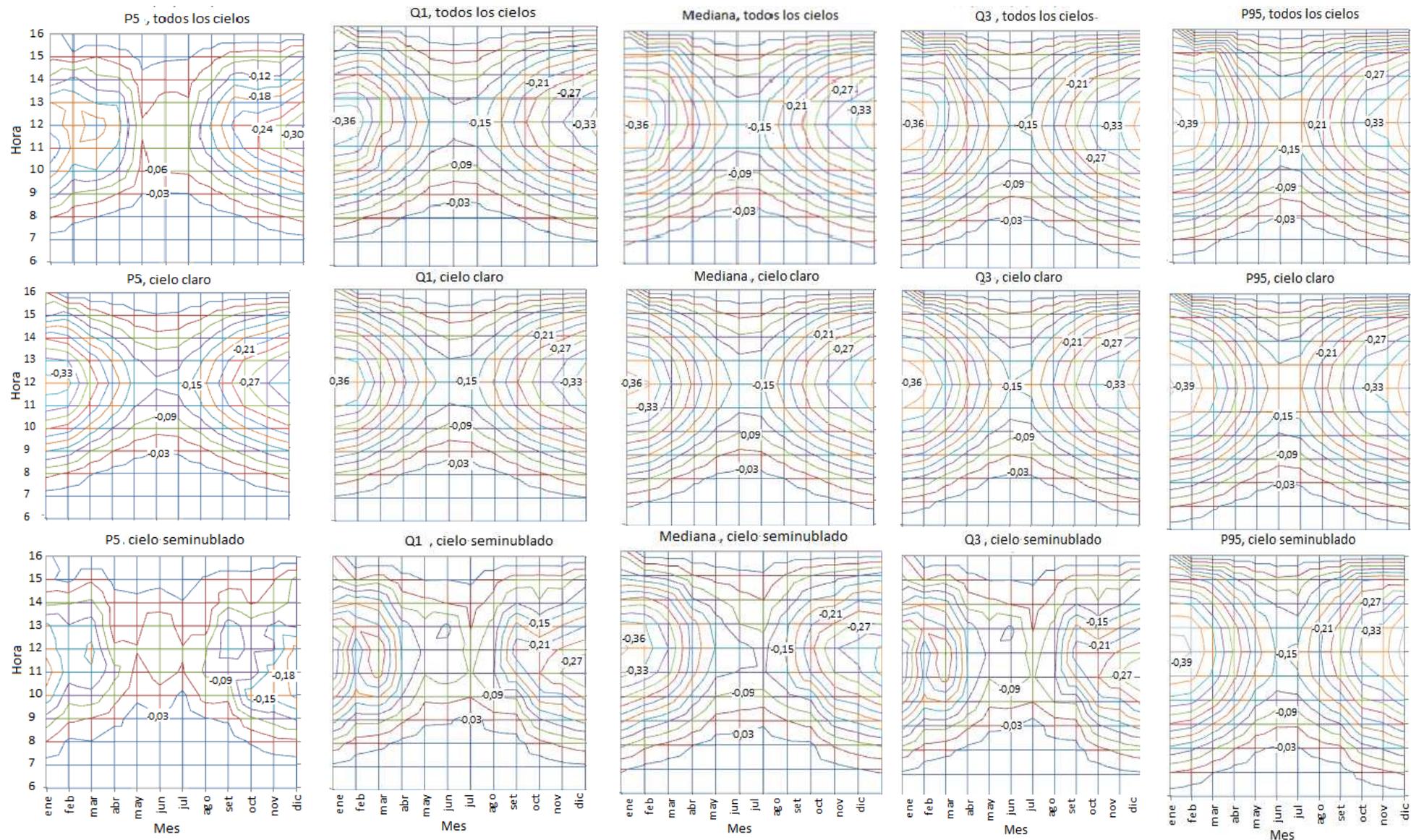


Figura 6: Percentiles de irradiancia UVER horaria en función del mes y la hora para distintas condiciones de cielo (W/m^2), la Puna (2014-2017)

La figura 6 suministra información sobre los percentiles de la distribución de irradiancia UVER horaria durante cada hora y para cada mes. La variación diaria de cada mes se observa mediante una línea paralela al eje de las horas y centrada en un mes, y la variación mensual mediante una línea paralela al eje de los meses centrada en una hora. Los datos se graficaron desde las seis (6:00 h) hasta las dieciséis (16:00 h) debido a la escases de datos en los periodos cercanos al orto y al ocaso para realizar la distribución.

Se observan dos simetrías, una respecto al mediodía solar y la otra respecto a los solsticios. Los máximos valores aparecen en las horas centrales del día debido a la evolución diaria del ángulo cenital, ya que en las horas centrales este ángulo es mínimo. Las gráficas de la figura 6 muestran, en general, un patrón similar para las distintas condiciones de cielo. Para la situación de todos los cielos la irradiancia UVER al mediodía es mayor en los meses de verano (diciembre y enero), alcanzando valores de $0,39 \text{ Wm}^{-2}$ para los cielos claros en los percentiles más altos, mientras que la irradiancia más pequeña, al mediodía, ocurre en invierno (junio y julio), pasando de $0,18 \text{ Wm}^{-2}$ en los percentiles más altos a $0,09 \text{ Wm}^{-2}$ en los más bajos. Existe una tendencia de la irradiancia a disminuir más rápidamente en horas de la tarde que aumentar en la mañana (febrero y marzo por ejemplo). Este descenso observado de UVER (o gradiente) se visualiza por el aglutinamiento de isolíneas, más pronunciado durante la tarde. Esto se debe a la formación de nubes en el transcurso del día, propios del “invierno andino”.

La tabla 2 contiene los distintos índices estadísticos de las distribuciones de irradiación UVER horaria en función de la hora y para el mes de febrero. Estos índices son: número de datos (N), media aritmética (M), mediana (Md), máximo (Mx), mínimo (Mn), primer (Q1) y tercer (Q3) cuartil, rango intercuartil (RIC), percentiles 5 (P5) y 95 (P95), coeficiente de variación intercuartil (V), desviación estándar (SD), sesgo (g), y curtosis (k). Los valores más altos de irradiación UVER se producen en las horas centrales, de 11:00 a 13:00 h. Los valores máximos están próximos a los valores del percentil 95 (inferiores al 8 %), con lo que se asegura que los máximos son bastante representativos, mientras que los valores mínimos no son representativos debido a la gran diferencia con el percentil 5 (40% a 60%). Las magnitudes de las diferencias son generales, aunque las ejemplificadas corresponden al mes de febrero.

Hora	N	M	Md	Mx	Mn	Q1	Q3	RIC	P5	P95	V	SD	P	g	k
5,5-6,5	3028	4,02	3,03	13,68	0,19	1,49	6,04	4,55	0,65	10,33	0,60	0,00	77,13	0,90	-0,18
6,5-7,5	3194	27,65	25,62	60,16	4,03	16,39	37,92	21,53	9,91	51,59	0,40	0,01	47,84	0,41	-0,88
7,5-8,5	3360	84,21	83,30	141,12	15,92	63,25	106,71	43,46	37,85	129,39	0,26	0,03	33,25	-0,07	-0,73
8,5-9,5	3360	166,82	170,68	242,42	35,80	144,28	197,93	53,65	86,12	223,63	0,16	0,04	24,36	-0,69	0,14
9,5-10,5	3360	253,98	263,59	345,91	84,12	237,90	286,91	49,01	139,28	309,75	0,09	0,05	19,12	-1,41	1,91
10,5-11,5	3360	318,38	334,25	411,09	111,24	316,41	349,71	33,31	173,31	365,65	0,05	0,05	17,27	-2,09	3,70
11,5-12,5	3360	336,70	360,66	417,75	79,15	347,99	369,22	21,23	162,27	381,59	0,03	0,07	19,76	-2,21	3,70
12,5-13,5	3360	322,08	337,82	398,48	78,77	319,02	352,81	33,78	170,67	372,08	0,05	0,06	17,70	-2,29	5,06
13,5-14,5	3360	256,33	267,16	356,85	49,46	240,52	292,38	51,86	127,39	316,88	0,10	0,05	21,26	-1,49	2,21
14,5-15,5	3360	159,95	170,32	260,74	11,49	138,40	200,07	61,68	38,75	228,62	0,18	0,05	34,10	-0,92	0,23
15,5-16,5	3360	77,28	75,93	155,92	4,21	55,83	103,10	47,27	17,77	130,44	0,30	0,03	43,13	-0,10	-0,69
16,5-17,5	3360	24,87	22,04	68,52	0,60	14,59	34,12	19,53	4,80	51,53	0,40	0,01	56,21	0,57	-0,41

Tabla 2: Índices estadísticos de la irradiancia UVER horaria en el mes de febrero, la Puna (2014-2017). Valores en mWm^{-2} .

En el caso de febrero, figura 7 (a) y (b) la media es mayor que la mediana durante las primeras horas de la mañana y al final de la tarde, mientras que durante las otras horas del día la relación se invierte. Las distribuciones horarias presentan mayor estabilidad en las horas centrales del día y menores en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde, según el coeficiente de variación intercuartil (V). En lo referente al sesgo, las distribuciones horarias de febrero muestran asimetrías negativas la mayor parte del día, siendo las más fuertes en torno al mediodía. En las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde el sesgo se invierte a positivo. La curtosis es positiva la mayor parte del día, en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde es negativa.

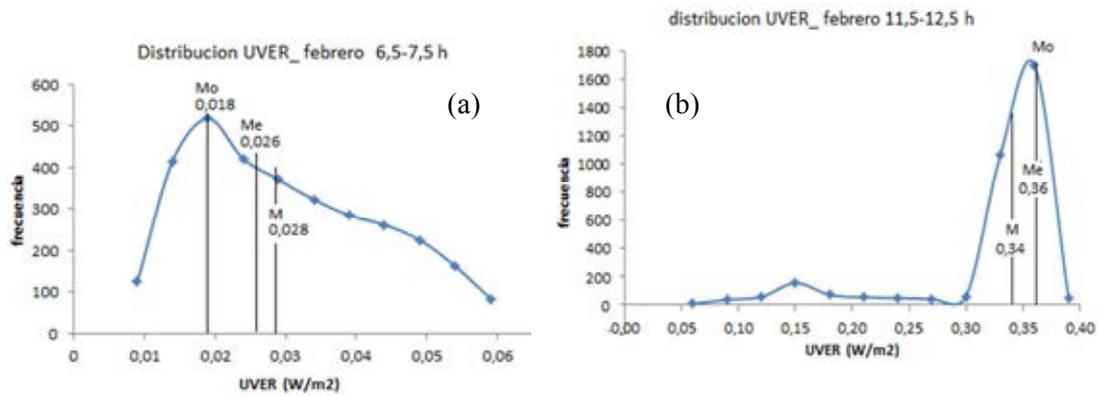


Figura 7: Distribución horaria de radiación UVER en febrero: (a) 6,5-7,5 h (b) 11,5-12,5 h, la PUNA.

El gradiente de la irradiancia con el mes, en el caso de las horas claras, no varía con el número de percentil. Esto implica que la variación del gradiente con el percentil en el resto de condiciones de cielo es debido a la atenuación de las nubes. Este gradiente es mayor en los meses de primavera y otoño, siendo muy poco pronunciado en los meses de verano, lo cual se debe a la evolución anual del ángulo cenital solar (θ_z) en las horas centrales. El θ_z en las horas centrales varía con el mes de forma sinusoidal, siendo su variación más brusca durante los meses de primavera y otoño.

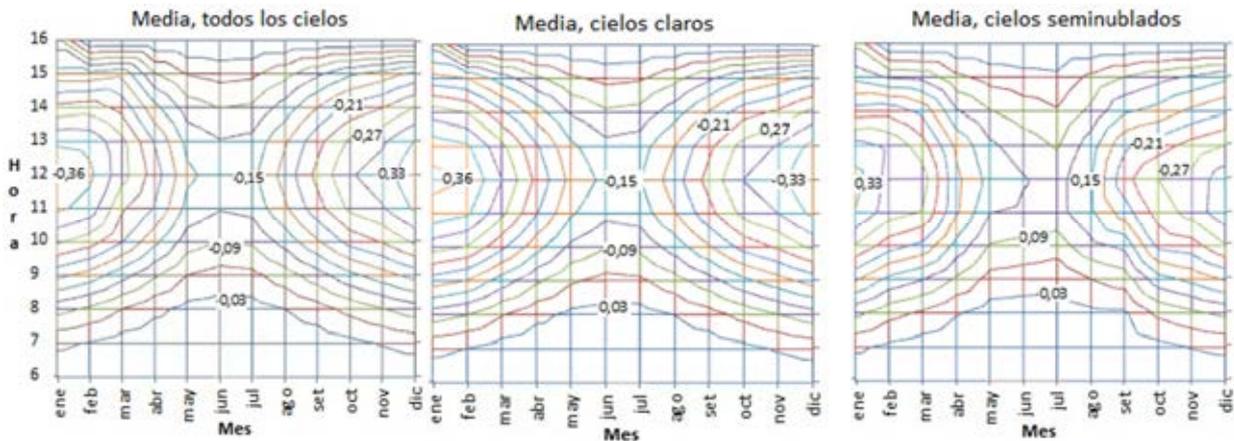


Figura 8: Media de irradiancia UVER horaria en función del mes y la hora para distintas condiciones de cielo (Wm^{-2}), la PUNA (2014-2017).

Uno de los indicadores estadísticos más significativos es la media, la cual está representada en la figura 8 para las distintas condiciones de cielo. Se observan las dos simetrías advertidas en los percentiles, al igual que los gradientes de irradiancia a lo largo del año son más pronunciados en los meses de verano, marzo y otoño, más aun durante la tarde. Se observa la influencia del “invierno andino” que provoca elevados gradientes de irradiancia UVER durante la tarde en los meses de enero, febrero y marzo. Los valores máximos de irradiancia UVER alcanzan los $0,36 Wm^{-2}$ en las horas centrales del día, estos se reducen a $0,15 Wm^{-2}$ en el mediodía invernal. Para cielos seminublados los valores máximos y mínimos en el mediodía son de $0,33 Wm^{-2}$ y $0,12 Wm^{-2}$.

Finalmente se analizan los índices estadísticos referentes a los momentos centrales respecto de la media. En la figura 9 se grafican las isolíneas de la desviación estándar, el sesgo y la curtosis para todas las condiciones de cielos. La desviación estándar en las horas centrales del día muestra su máximo en los meses de diciembre, enero y febrero, debido a la influencia del “invierno andino”, con la formación de nubes cumuliformes ascendentes a partir del mediodía. En cuanto al sesgo este es positivo en las primeras horas de la mañana (6:30 a 8:30 h), con valores inferiores a la unidad, luego la distribución cambia a sesgo negativo hasta las 15:30 h con valores entre 0,0 y -1,0; luego torna a positivo hasta el atardecer. Los meses de verano y primavera son los más asimétricos. Enero, febrero,

marzo, setiembre, octubre, noviembre y diciembre son los meses que mayor sesgo, negativo, tienen al mediodía. Hay una curtosis muy grande en los meses de setiembre y noviembre, siempre las mayores se dan en las horas centrales del día (leptocurticas). En las primeras horas de la mañana (hasta las 9:30h), la curtosis es negativa (platicurtica), aunque sus valores son cercanos a cero, por lo que se las puede considerar aproximadamente mesocurticas, lo mismo ocurre durante la tarde (después de las 14:30h).

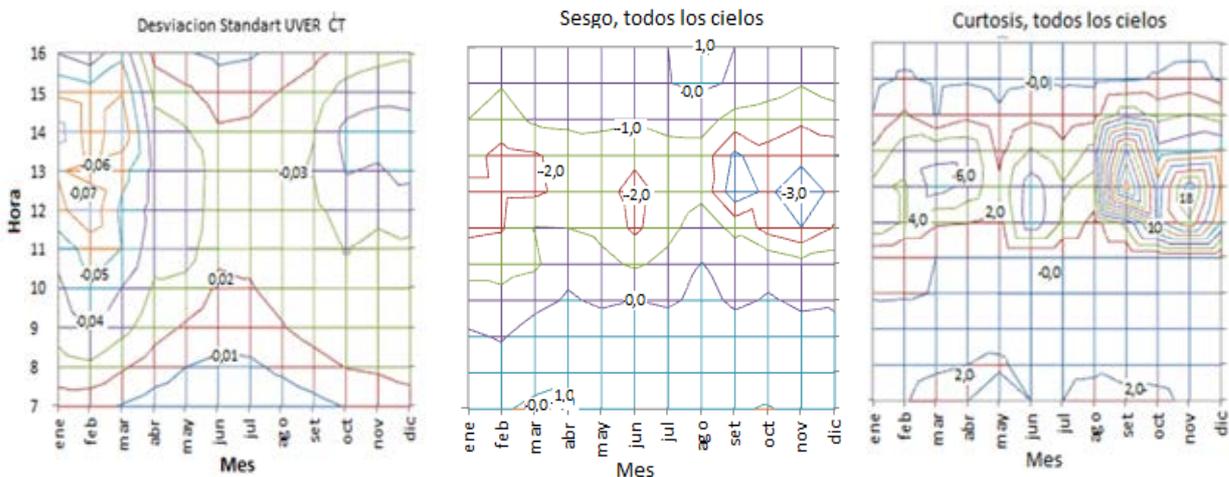


Figura 9: Momentos centrales de la irradiación UVER horaria para todas las condiciones de cielo: desviación estándar, sesgo y curtosis; la Puna (2014-2017).

IRRADIACIÓN UVER HORARIA ACUMULADA

La producción del eritema está relacionada con la cantidad de irradiación recibida acumulada, por lo que es necesario realizar un análisis de la radiación UVER acumulada durante un día o partes de un día. Por lo tanto se evaluó la irradiación UVER acumulada por horas. En la figura 10, se muestra la acumulación media de cada mes independientemente de la condición del cielo. A su vez también se tiene en cuenta el número de dosis mínimas eritémicas (MED) recibidas a lo largo del día para una persona del fototipo II ($MED II=250 \text{ Jm}^{-2}$). En ella se muestra que la máxima acumulación diaria ocurre en el mes de diciembre, con $7,72 \text{ KJm}^{-2}$ ($30,89 \text{ MED II}$). El máximo acumulado en una hora, $1,27 \text{ KJm}^{-2}$, también se da en enero entre las 11:30 y las 12:30 h. En las horas centrales es cuando más aumenta la irradiación acumulada. Las mínimas ocurren en invierno con valores de $2,49 \text{ KJm}^{-2}$ ($9,98 \text{ MED II}$).

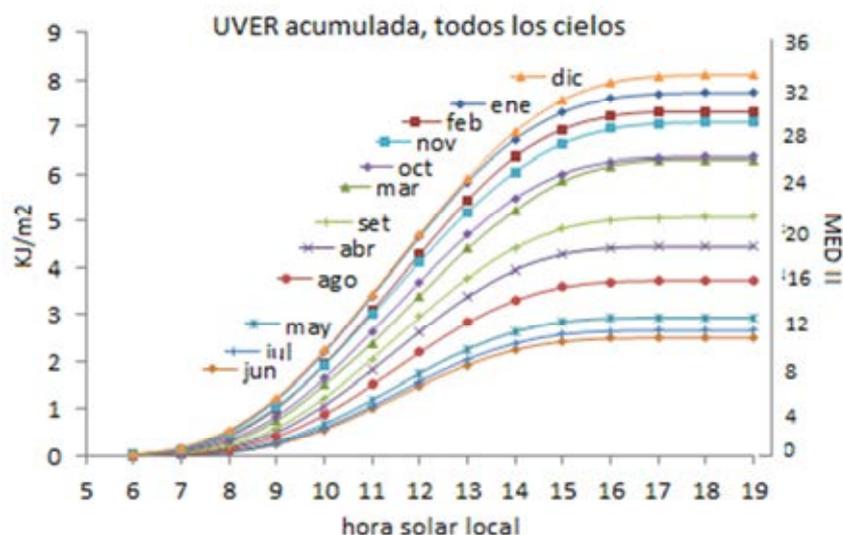


Figura 10: Media UVER acumulada y dosis MED II, según la hora y para cada mes del año; la Puna.

A continuación se describen varios ejemplos acerca de la dosis promedio recibida por una persona del fototipo II en la región de Puna. En el caso más extremo, una persona del fototipo II expuesta al sol durante todo un día de diciembre, recibirá aproximadamente 31 veces la dosis mínima para la producción de eritema. Si esta persona estuviera expuesta todo el día al sol en el mes de junio, recibiría 10 veces la cantidad necesaria para quemarse la piel. Si se estuviera expuesto de 10:30 a 13:30 h en diciembre una persona del fototipo II recibe una cantidad aproximadamente 10 veces mayor a la mínima para causar el eritema. Si el mes fuera junio esa cantidad se reduce a 4 MED II. En las primeras y últimas horas del día la dosis recibida es inferior, aunque en los meses de verano, hasta las 10:30 h en la mañana o su simétrico en la tarde se llega a recibir de media lo mismo que en todo un día de junio.

ÍNDICE UV HORARIO

Se realizó un análisis de la irradiación UVER por hora típica, medida como índice UV, ya que su interpretación es más intuitiva para comunicar a la población de la peligrosidad promedio de exposición al sol de manera gráfica y sencilla. En la figura 11 se ha desarrollado un conjunto de gráficas de distribución de IUUV para distintas condiciones de cielo. Se observa que bajo cielos claros se puede alcanzar un IUUV promedio de 16 en los meses de verano (enero y febrero), mientras que en cielos seminublados el IUUV medio alcanza el valor 14 durante esos mismos meses. En un día típico nublado de mayo, se midió un IUUV máximo de 2,5 a las 10:00 h. El valor máximo de irradiancia eritémica (IUUV=19,5) se produjo el 20/01/2015 al mediodía solar. La variación de UVER o salto UV eritémico más probable entre la temporada estival e invernal fue de 11,0 IUUV y correspondió a un descenso porcentual del 65%. Durante los meses de junio y julio la radiación UVER fue mínima con promedios de 6,0 IUUV (riesgo moderado). Los máximos de IUUV superaron ampliamente el umbral indicado como de *riesgo extremo* de quemadura solar.

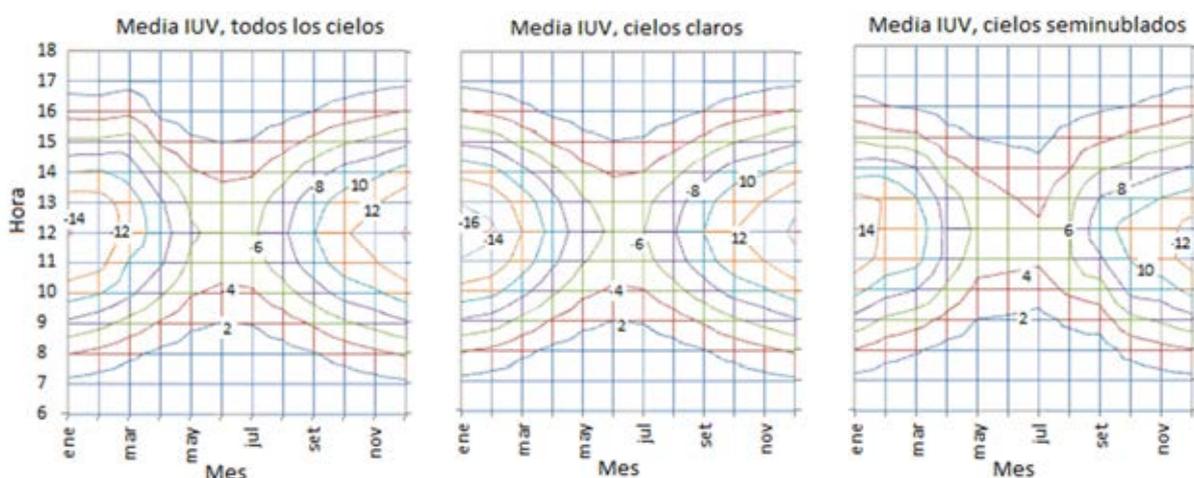


Figura 11: IUUV medio horario, en función del mes y la hora para distintas condiciones de cielo, la Puna (2014-2017).

De acuerdo a la clasificación de riesgo solar sugerido por la WHO y a su representación a través del código internacional de colores, se pueden construir mosaicos de riesgo solar. En él se ilustra el tipo de riesgo según el valor del IUUV y el código internacional de colores, *bajo* (<3), *moderado* (3-5), *alto* (6-7), *muy alto* (8-10) y *extremo* (>10). Esto a los fines de una mejor interpretación por parte de la población. El caso en que no se discrimina el tipo de cielo se ilustra en la figura 12.

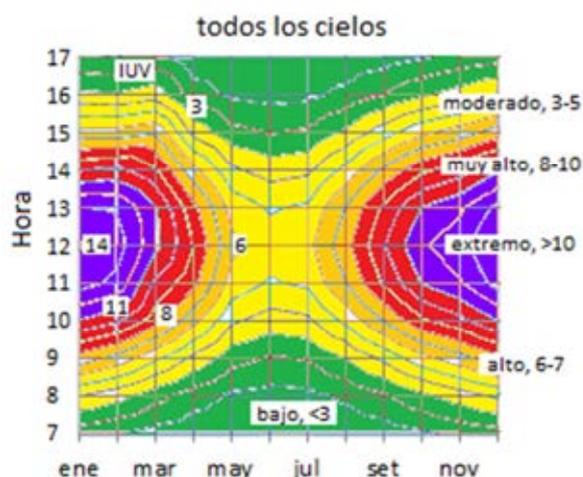


Figura 12: Mosaico de Riesgo Solar en IUV y en escala internacional de colores (WHO).

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado la distribución del año típico de radiación UVER diaria y horaria en la estación radiométrica Tolar Grande; para todas las condiciones de cielo, cielos claros y seminublados. Esta distribución ha sido analizada estadísticamente y sus resultados pueden ser extendidos a la región de Puna. Se construyeron mapas de distribución de UVER como isólinas y *mosaico de riesgo solar*. A través de las isólinas calculadas se puede obtener la irradiancia UVER y el índice UV promedio al que se expone una persona en una determinada hora y mes. El número de días con cielo claro, para un determinado mes, supera ampliamente al de cielos seminublados y aún más al de nublados. La mayor cantidad de días con CC (96,7%) ocurre en setiembre, donde los CS (2,2%) y los CN (1,1%) son considerablemente menores. Solo en enero, el número de CS (60%) supera a los CC (40%). Las horas de exposición más peligrosas para la piel son las centrales de los meses de diciembre y enero.

Del análisis de la irradiación UVER acumulada, se deduce que una persona del fototipo II expuesta al sol durante todo un día de diciembre, recibirá aproximadamente 31 veces la dosis mínima para la producción de eritema. Si esta persona estuviera expuesta todo el día al sol en el mes de junio, recibiría 10 veces la cantidad necesaria para quemarse la piel. Si se estuviera expuesto de 10:30 a 13:30 h en diciembre una persona del fototipo II recibe una cantidad aproximadamente 10 veces mayor a la mínima para causar el eritema. Si el mes fuera junio esa cantidad se reduce a 4 MED II. Niveles de riesgo solar *extremo* muy elevados se registraron durante los meses de verano, también en primavera y otoño. Niveles de riesgo solar *moderado* y *bajo* no se presentaron al mediodía solar en verano, ocurrieron solo en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde. En los meses de invierno, estos niveles se dan durante todo el día.

Los Índices UV medidos *alto - extremo* abarcan una gran franja temporal (entre las 9:00 y 15:00 hora solar local) para la temporada estival, este valor de riesgo UV permaneció hasta el mes de abril y reinició en el mes de setiembre en este sitio de altura. En la estación invernal el riesgo UV mayormente fue *moderado - bajo*. Durante la primavera y otoño se midió IUV *alto, muy alto* y *extremo*. Las dosis acumuladas fueron grandes, por lo que todos los diferentes fototipos cutáneos están expuestos al daño eritémico. Estas dosis UVER exceden largamente el valor límite umbral (LEV) recomendado por la WHO, aproximadamente 100 J/m^2 para una exposición de 8 h sin riesgo para la salud. En vista de este análisis se concluyó que es de suma importancia adoptar medidas de protección a la exposición UVER, sobre todo en las cuatro horas en torno al mediodía solar, donde se midieron dosis de aproximadamente el 60% de la diaria total. En un futuro el año típico se actualizará temporalmente para obtener valores más completos y con mayor peso estadístico.

REFERENCIAS

- Blumthaler, M., Ambach, W., and Ellinger, R. (1997). Increase in solar UV radiation with altitude. *J. Photochem. Photobiol. B-Biol.*, 39:130–134.
- Cede A, Luccini E, Nuñez L, Piacentini R D, Blumthaler M, Monitoring of erythemal irradiance in the Argentine ultraviolet network, *J. Geophys. Res.* 107 (2002) 4165.
- Franco, JA.: Metodologías de generación y comparación de años meteorológicos típicos, aplicación a sistemas solares térmicos, fotovoltaicos y pasivos, tesis doctoral, Universidad de Valladolid, 2002.
- Madronich S. y Flocke S. (1997). Theoretical Estimation of Biologically Effective UV Radiation at the Earth's Surface. NATO ASI Series, Vol. I 52. Springer – Verlag.
- Suárez, H. et al. (2013). Medición de radiación eritémica en sitios de altura de la Provincia de Salta. ASADES.
- WHO (2002). Global solar UV index. A practical guide. World Health Organization.

ABSTRACT

ERITEMIC UV RADIATION AT THE PUNA: DAILY AND HOURLY STATISTICAL STUDY FOR A TYPICAL YEAR

A typical year of solar UV radiation (UVER) has been developed in the town of Tolar Grande, located in the Puna region of the province of Salta (lat: -24,59; long: -67,40 and 3560 m.s.n.m). It has been analyzed statistically by different indices: percentiles, mean, standard deviation, bias, kurtosis and others. The analysis has been performed for daily and hourly doses of UVER radiation; and in instantaneous values of irradiation UVER hourly. We worked first with data of all types of skies (CT) and then divided them into 3 categories: clear sky (CC), partially cloudy (CS) and cloudy (CN). The predominant character of the type of sky was checked every month. Graphs were made to inform about the ultraviolet index (UVI) and the hourly and daily erythemic doses received in the Puna region according to the condition of the sky.

Keywords: solar radiation, UV index, erythema, Puna

NUEVAS CARRERAS EN ENERGÍAS RENOVABLES EN URUGUAY: INGENIERÍA Y TECNÓLOGO

J.F. Mathisson Malvasio¹, M. Coletto², M.P. Calcagno³, G. Suárez⁴, J.M. Aguiar⁵
Carrera de Ingeniería en Energías Renovables (IEER)
Universidad Tecnológica - Instituto Tecnológico Regional Centro Sur (UTEC-ITRSC)
Francisco Antonio Maciel s/n esq Luis Morquio C.P. 97000 – Durazno – Uruguay
Tel (+598) 4362 0217, e-mail: juan.mathisson@utec.edu.uy

Recibido 13/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: La Universidad Tecnológica (UTEC) del Uruguay es una propuesta de educación pública, de perfil tecnológico, que amplía la oferta terciaria universitaria en el interior de Uruguay, fomentando el vínculo con el medio productivo y la promoción del desarrollo social y cultural del país. En 2016 se comienza a dictar la carrera de Ingeniería en Energías Renovables en la ciudad de Durazno. Tiene una duración de diez semestres, donde al sexto se obtiene el título intermedio de Tecnólogo en Energías Renovables (mención Eólica o Solar). La creación de la carrera responde a las necesidades surgidas de la transformación tecnológica que el país viene experimentando de manera rápida y significativa en el área de las energías renovables. Tiene como objeto formar profesionales para implementar y mantener instalaciones de generación de energías renovables, e investigar, con el fin de contribuir al desarrollo futuro del país; con un perfil de egreso basado en competencias.

Palabras clave: educación, energías renovables, energía solar, energía eólica, tecnólogo.

INTRODUCCIÓN

El informe REN21 del año 2016 (REN21, 2016) menciona que durante el año 2015 se observa a nivel mundial, el mayor incremento de capacidad en energías renovables constatado hasta ese momento. A su vez, durante ese año se suceden acontecimientos que tienen impacto sobre la energía renovable, incluyendo una drástica disminución del precio de los combustibles fósiles. También destaca el posicionamiento a nivel mundial de las energías renovables ya como fuentes principales de energía. Menciona diversos factores que contribuyen a ese rápido crecimiento, que se da particularmente en el sector eléctrico, tales como la mejora en el costo-competitividad de las tecnologías renovables, iniciativas en políticas, mejor acceso al financiamiento, seguridad energética y preocupación por el medio ambiente. Agrega, que todo lo anterior es causante de que nuevos mercados, tanto en energía renovable centralizada como en distribuida, que emergen en todas las regiones.

Hay una apuesta a nivel mundial en utilizar las energías renovables e integrarlas cada vez más en la matriz energética de todos los países. A modo de ejemplo, la Unión Europea, a través de los “Objetivos clave de la UE para 2030”, propone metas claras como la reducción del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a 1990, 27% del consumo total de energía procedente de energías renovables y el incremento del 27% de la eficiencia energética, (EUCO 169/14, 2014)

¹Docente Encargado de Sistemas de Energía Eólica - UTEC

²Docente Encargado de Sistemas de Energía Solar Térmica - UTEC

³Docente Encargado de Proyectos - UTEC

⁴Docente Encargado de Seguridad y Salud Ocupacional – UTEC

⁵Coordinador de la Carrera de Ingeniería en Energías Renovables - UTEC

Situación en Uruguay respecto a las Energías Renovables

El Uruguay cuenta con cuatro centrales hidroeléctricas, tres de las cuales se encuentran sobre el Río Negro, y una sobre el Río Uruguay, la cual es compartida con la República Argentina. A su vez cuenta con centrales térmicas operadas por turbinas de vapor, turbinas de gas y motores a base de combustibles fósiles, así como generadores privados que utilizan biomasa como fuente de energía. En los últimos años se ha concretado la incorporación de generadores eólicos y solares, tanto públicos como privados. Por su parte, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) cuenta con interconexiones con Argentina (2000 MW) y con Brasil (570 MW). Basado en los datos del Balance Energético Preliminar de 2017, (BEN, 2017), el Uruguay tiene una potencia total instalada de 4542 MW, incluyendo los generadores conectados al SIN, así como aquellos generadores de auto-producción aislados. La potencia instalada estuvo compuesta por aproximadamente 1544 MW de origen hidráulico, 1499 MW de origen eólico, 818 MW térmicos fósiles, 409 MW térmicos biomasa y 227 MW de generadores solares fotovoltaicos. Considerando la potencia instalada por fuente, el 82% corresponde a energía renovable (hidráulica, biomasa eólica y solar), mientras que el 18% restante constituye energía no renovable (gasoil, fueloil y gas natural). Como se aprecia en la figura 1, (BEN, 2017).

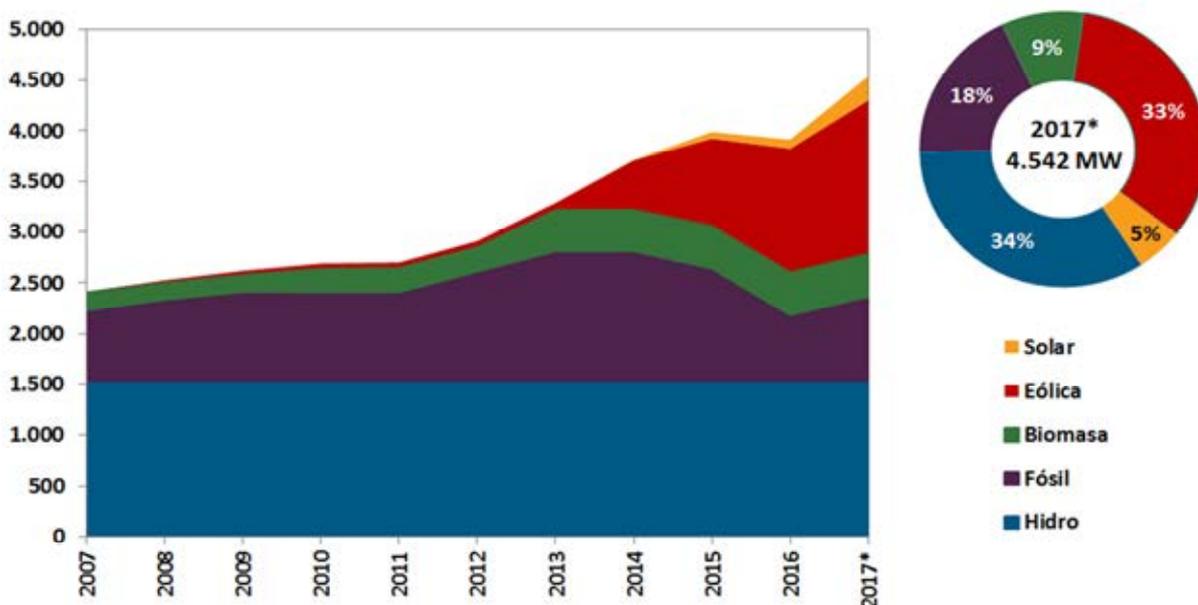


Figura 1. Datos preliminares de la potencia instalada total por fuente en 2017 en Uruguay. Fuente BEN (2017)

FUNDAMENTACIÓN DE LA FORMACIÓN EN EL ÁREA

Universidad Tecnológica (UTEC)

Desde inicios de la última década (2010), la economía de Uruguay está experimentando cambios estructurales muy importantes entre los cuales se destaca el aumento significativo en la tasa de inversión con relación al PBI, una expansión en la importación de bienes de capital y equipos de uso industrial y agropecuario de muy diversos orígenes que explican cambios relevantes en las trayectorias tecnológicas sectoriales. Esa rápida transformación tecnológica también cambia la demanda de formación de las personas, no sólo destinadas al empleo directo de los nuevos procesos, sino también personas formadas para vincularse al área de extensión e investigación adaptativa asociada a la inversión.

Es así que la Ley de creación de la UTEC (Ley 19.043, 2012), aprobada por unanimidad en el Parlamento Nacional el 28 de diciembre de 2012, en su art. 2 define los siguientes fines (se citan textualmente los incisos A al D):

- A) Contribuir al desarrollo sustentable del país.
- B) Formar profesionales con un perfil creativo y emprendedor, con alto nivel ético y técnico, dotados de fuerte compromiso social y aptos para una inserción crítica y proactiva en el trabajo y la sociedad, con capacidad para la gestión de las organizaciones, así como para identificar problemas y proyectar soluciones acordes a cada situación.
- C) Acreditar, difundir y promover la cultura a través de la investigación de la extensión y contribuir al estudio de los problemas de interés nacional o regional. Promover la innovación tecnológica y la agregación de valor y calidad a los procesos sociales y técnicos con los que se relacione.
- D) Ofrecer la educación correspondiente a su nivel vinculándose a los diversos sectores de la economía, en especial a aquellos asociados a los desarrollos socio-económicos, tecnológicos y culturales de carácter local, nacional y regional.

La UTEC está comprendida dentro de la Educación Pública del Uruguay, y específicamente en la Terciaria universitaria, que al igual que la Educación Inicial, Primaria, Media básica, Media superior, Técnica terciaria, y de posgrado, es gratuita. (Ley 18.437, 2008)

Por tanto, la UTEC nace como una propuesta de educación pública, de perfil tecnológico, comprometida con la ampliación de la oferta terciaria universitaria en el interior de Uruguay, fomentando el vínculo con el medio productivo y la promoción del desarrollo social y cultural del país.

Justificación de formar en Energías Renovables (EERR)

A partir de lo que constata acerca de la significación que las EERR tiene hoy en el mundo y, específicamente en Uruguay, atendiendo a los lineamientos institucionales, para fundamentar la necesidad, pertinencia y factibilidad de la creación de una oferta UTEC en esta área, se llevó a cabo un profundo proceso de diagnóstico y análisis, abordando los siguientes temas (Aguar, 2016; Baptista, Martínez y Tenenbaum, 2014a; Baptista y Tenenbaum, 2013a; Baptista y Tenenbaum, 2013b; Baptista, Martínez y Tenenbaum, 2014b):

- El diagnóstico de necesidades del medio nacional que serán abordadas por el futuro profesional.
- La investigación del mercado ocupacional del futuro profesional o profesional en ejercicio.
- La justificación de la perspectiva académica respecto del estado del arte.
- El análisis de la oferta: Investigación de las instituciones nacionales y extranjeras que ofrecen programas afines a la propuesta.
- El análisis de la demanda: características de la población estudiantil a la cual está dirigido el programa propuesto y perfil de ingreso.

Del proceso anterior mencionado, se citan los siguientes resultados relevantes:

Las EERR como factor de igualdad e integración social: El acceso a la energía es muy desigual en el mundo y también al interior de cada país, y como consecuencia grandes sectores de la población mundial carecen de un acceso adecuado a la energía. Es ahí donde las políticas energéticas pueden constituir un poderoso instrumento de desarrollo de un país al promover la igualdad al interior de cada sociedad, impulsando la integración social, promoviendo hábitos de consumo saludables, en definitiva, para mejorar la calidad de la democracia. En Uruguay, la inclusión de los aspectos sociales del acceso y uso de la energía en las políticas estatales es nueva. Por ello, el impulso de un área de estudio en torno al tema energético, puede incidir de manera significativa a través del tratamiento de los aspectos tecnológicos de esta cuestión, promoviendo el estudio en profundidad de las alternativas tecnológicas apropiadas para satisfacer las necesidades de toda la población del país.

Los aspectos económicos y medioambientales de las EERR: En la política Energética Nacional la temática ambiental se integra en las diversas dimensiones que la componen, siendo una de las

prioridades cuando se trabaja por un desarrollo sostenible, a la vez que brinda insumos para que los tomadores de decisión cuenten con datos más precisos a la hora de confirmar y ajustar las líneas de trabajo definidas, (Olivet, 2014).

Los requerimientos en materia de investigación aplicada y recursos humanos altamente calificados:

El país cuenta actualmente con un conjunto de investigadores en la Universidad de la República (UdelaR), trabajando en varios aspectos relacionados con las Energías Renovables, a su vez el país cuenta también con varios técnicos e investigadores del área social y económica, así como ingenieros y matemáticos, dispersos en varios organismos del Estado, que estudian temas relacionados con la Energía. Los investigadores que trabajan en esta área comparten las dificultades generales de los creadores de conocimientos en Uruguay (financiamiento discontinuo de proyectos, bajo nivel relativo de salarios, estudios de posgrados, etc.), y, por ende, muchos de ellos no trabajan en exclusividad en la investigación sobre temas energéticos. Por ello, se vio importante la creación de conocimientos desde el ámbito académico y la formación de especialistas en temas afines a la energía, en particular en el interior del país. Se constata que el sector académico del área energética precisa crecer, atraer a los jóvenes, formar profesionales altamente capacitados, formar nuevos investigadores y contactarse fluidamente con otras áreas del conocimiento de las energías renovables en particular, así como una mayor articulación con el sector productivo.

Mercado ocupacional: El marcado aumento en la instalación de nuevos proyectos de EERR, está exigiendo de las organizaciones la necesidad de contar con personas altamente capacitadas y entrenadas en nuevas metodologías vinculadas a la alta tecnificación, exigencia productiva, gestión y mantenimiento de centrales de generación de energía, instalación y mantenimiento de sistemas de micro-generación, el monitoreo y control de la generación de energía, seguridad, entre otros.

FUNDAMENTACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LA CARRERA EN EL TERRITORIO

Demanda de formación a nivel nacional: En todas las regiones estudiadas se pudo observar que en el área de Energías Renovables la demanda de formación a nivel de Tecnólogo es superior a la demanda de formación a nivel de grado universitario, y que, dentro de las regiones consideradas, la región centro-sur es la que tiene mayor demanda en grado universitario. De ahí resulta la conveniencia de que el Instituto Tecnológico Regional Centro Sur (ITRCS) ubicado en la ciudad de Durazno, sea un instituto especializado en EERR, y ofrecer desde allí formación de calidad en esta área al resto de la región y del país. De esta manera, la instalación de una oferta académica y de investigación en EERR en el ITRCS permitirá actuar como un catalizador para la zona de influencia, impulsando el desarrollo humano y de la producción local y nacional. La región centro-sur y en particular la ubicación de Durazno en el centro de país, constituye de manera estratégica un punto neurálgico en la vida productiva del país. A su vez, se puede apreciar en la figura 2 la ubicación de los parques eólicos ya instalados, principalmente en la región centro-sur. Del mismo modo, en la figura 4 se observa la localización de las centrales de biomasa, en lo que es el corredor de la Ruta 5 (que conecta Rivera con Montevideo, y donde también se ubica Durazno). Este conduce a que la existencia de necesidades en formación en la región gravite hacia Durazno, no obstante, como se observa (Figura 5) en los próximos años habrá un aumento considerable en la demanda de personas formadas en energía fotovoltaica en el litoral oeste del país, debido a los proyectos aprobados en solar fotovoltaica con destino al SIN. (MIEM, 2017)

La tabla siguiente presenta los niveles de necesidad de los niveles de formación según las tres regiones en las cual se subdivide el territorio nacional para el análisis.

REGIÓN	NIVEL DE FORMACIÓN	NIVEL DE NECESIDAD
Centro-Sur	Grado Universitario	Alto
Centro-Sur	Tecnólogo	Alto
Suroeste	Grado Universitario	Medio
Suroeste	Tecnólogo	Bajo

Norte	Grado Universitario	Bajo
Norte	Tecnólogo	Medio

Tabla 1. Necesidades de formación en EERR según región. Fuente: Aguiar (2016)



Figura 2. Parque Eólicos instalados al 2017 (MIEM, 2017).

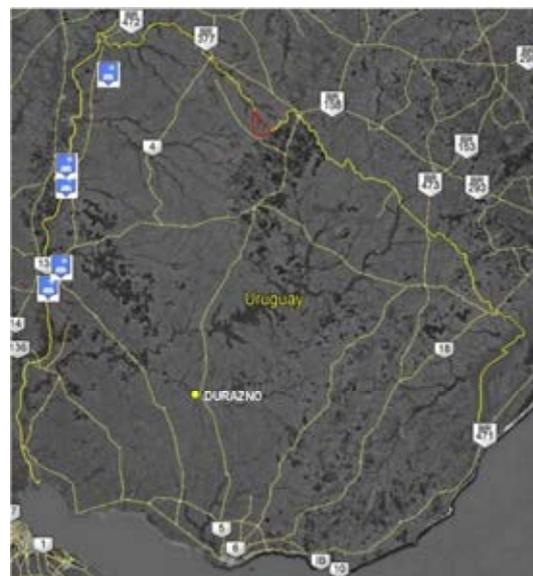


Figura 3. Centrales fotovoltaicas instaladas al 2017 (MIEM, 2017).

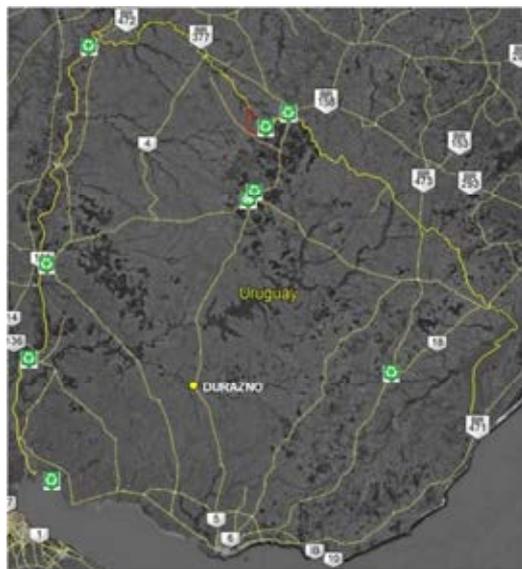


Figura 4. Centrales térmicas de biomasa instaladas al 2017 (MIEM, 2017).



Figura 5. Proyectos fotovoltaicos aprobados (MIEM, 2017).

Oferta Nacional en formación en Energías Renovables

La oferta de formación terciaria asociada a energías alternativas es especialmente débil en el interior del país, identificándose solo dos carreras ofrecidas muy recientemente con algún vínculo con el tema, y ninguna de ellas tiene nivel universitario.

Hasta el año 2016 la oferta existente fue el tecnólogo agro-energético (carrera en conjunto entre la Universidad de la República y Consejo Técnico Profesional), la cual se dictó desde el año 2010 en la ciudad de Bella Unión, con una duración de 3 años. La otra carrera es el curso Técnico Terciario en

Energía Solar Térmica, brindado por el Consejo Técnico Profesional en el departamento de Paysandú a partir del año 2012, curso con una duración de 64 horas y que es una especialización de la carrera de Ingeniería Tecnológica que brinda la institución.

A nivel universitario se destaca la existencia de una carrera de posgrado en el área de la energía, denominada “Maestría en Ingeniería de la Energía”, si bien cuenta con módulos dedicados a las energías renovables, no se enfoca directamente en dicha área; la misma es dictada mayoritariamente en la Facultad de Ingeniería de la UdelaR, en la ciudad de Montevideo.

ENFOQUE ACADÉMICO

Energías Renovables como una disciplina

La UTEC decide generar un área disciplinar en torno a la actividad relacionada a las energías renovables en su conjunto, tanto desde la perspectiva de la producción de energía como la operación y mantenimiento de los sistemas de producción de energía.

Se requiere contar con una base de formación en el área de la matemática, física, química e ingeniería, para el desarrollo de sistemas de generación, dispositivos y materiales que utilicen la energía natural para su aprovechamiento sin impactos significativos en el medio ambiente y de la forma más eficiente. Las características propias de las fuentes de energías renovables, tal como su comportamiento fluctuante, constituye un desafío tecnológico para poder contar con esquemas de control y almacenamiento para regular la disposición de la energía y que sea útil para la sociedad; en consecuencia, se requieren conocimientos básicos de ingeniería de sistemas, electricidad, mecánica de los fluidos, control de procesos y de termodinámica.

El Tecnólogo en EERR como profesión

El rol profesional deberá abordar las siguientes dimensiones:

- ***Dimensión social***, como el conjunto de obligaciones y deberes que confiere la propia sociedad y frente a las cuales se crean expectativas en cuanto a su formación, preparación y desempeño.
- ***Dimensión profesional***, como las expectativas de derechos y obligaciones que el propio grupo profesional se plantea con relación al desempeño de su rol social.
- ***Dimensión institucional***, como el conjunto de deberes y derechos que corresponde a las necesidades que la institución y organización espera que los profesionales satisfagan.
- ***Dimensión ética***, como el compromiso ético con los valores de solidaridad, desarrollo humano, trabajo en redes, el medioambiente, el bienestar animal y la responsabilidad social por los resultados en el desarrollo de la tecnología.

El egresado aprenderá a distinguir entre fuentes de energía renovables y fuentes de energías no renovables, sus tipos y cuáles son las más implantados a nivel global y en el Uruguay. El Plan de estudio profundiza en el conocimiento del recurso energético, su medición, la estadística necesaria y su uso para evaluar lugares de instalación de sistemas de energías renovables, así como en aspectos relacionados con la legislación, la Seguridad y Salud Ocupacional y la evaluación de impacto medioambiental.

Perfil profesional de egreso por competencias. (Resolución 395/17, 2017)

El perfil de egreso se define a partir de las áreas de dominio profesional entendidas como el conjunto de competencias de diversa naturaleza que permite llevar adelante una determinada función en su profesión. Algunas áreas de dominio son específicas de cada tramo de la carrera y otras se inician en el tramo de Tecnólogo y se continúa desarrollando en el tramo final de Ingeniería.

Las competencias están comprendidas dentro de Áreas de Dominio, que se definen 7 áreas. Las áreas de dominio N° 1, 2 y 3, corresponden a las competencias requeridas para la obtención del título

intermedio de Tecnólogo. Las áreas de dominio de 1 a 7, corresponden a las competencias requeridas para la obtención del título en Ingeniería en Energías Renovables.

Del diagnóstico surge que es necesario formar tecnólogos en dos áreas diferentes: Eólica y Solar. Por lo que el área N° 3 se duplica, una perteneciente al perfil del tecnólogo opción Eólica, y la otra perteneciente al perfil del tecnólogo opción Solar.

Tecnólogo en Energías Renovables	
ÁREA DE DOMINIO	COMPETENCIA
ÁREA 1: Implementación y mantenimiento de instalaciones de generación de EERR con el fin de mejorar eficiencia energética, asegurando el cumplimiento del marco legal vigente y la normativa de seguridad.	1.1. Definición de procedimientos de mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos involucrados en las instalaciones, de manera autónoma o bajo supervisión.
	1.2. Instalación y puesta en servicio de sistemas de EERR de acuerdo a los estándares de calidad, procedimientos definidos por proveedores y directivas de los supervisores, entre otros.
	1.3. Mantenimiento y actualización de equipos y software de los sistemas de generación de energía desde el compromiso con la mejora continua, de manera autónoma o bajo supervisión.
	1.4. Organización y planificación del mantenimiento con apoyo de herramientas tecnológicas.
	1.5. Rendición periódica de cuentas sobre el estado de las instalaciones de generación de energía renovables a su cargo.
ÁREA 2 Desarrollo e implementación de medidas de seguridad. Manejo de riesgo en actividades y proyectos en los que participa.	2.1. Detección de fallas y riesgos en instalaciones y sistemas de energías renovables bajo su responsabilidad.
	2.2. Aplicación de normativa sobre la seguridad y prevención de riesgos de manera pertinente y efectiva en los sistemas de EERR.
	2.3. Elaboración de planes de contingencia para enfrentar situaciones críticas y riesgos a los efectos de evitarlos o minimizar sus efectos.
ÁREA 3: (EÓLICA) Implementación de proyectos en el ámbito de la Energía Eólica integrando equipos de megaproyectos, a los efectos de la atención de la oferta y demanda de energía eléctrica en un contexto determinado.	3.1. Identificación de tipo de demanda de Energía Eólica a los efectos del desarrollo de las soluciones más pertinentes al caso.
	3.2. Estudio y definición de factibilidad técnica y normativa de soluciones seleccionadas
	3.3. Organización y planificación para implementación de acuerdo al nivel de responsabilidad en el proyecto y atendiendo a criterios legales, de seguridad y calidad preestablecidos.
	3.4. Monitoreo y control del cumplimiento de actividades y logro de productos bajo su responsabilidad, rindiendo cuenta de los resultados y sugiriendo mejoras.
ÁREA 3: (SOLAR) Implementación de proyectos en el ámbito de la energía solar fotovoltaica-térmica en pequeña escala a los efectos de la atención de la demanda, residencial, de servicios y/o comercial y en un contexto determinado	3.1. Identificación de tipo de demanda de energía solar a los efectos del desarrollo de las soluciones más pertinentes al caso.
	3.2. Estudio y definición de factibilidad técnica y normativa de soluciones seleccionadas
	3.3. Organización y planificación para la implementación de solución seleccionada, de acuerdo al nivel de responsabilidad en el proyecto y atendiendo criterios legales, de seguridad y calidad preestablecidos.
	3.4. Monitoreo y control para el cumplimiento de actividades y logro de productos bajo su responsabilidad, rindiendo cuenta de los resultados y sugiriendo mejoras.

Tabla 2. Competencias Título intermedio de Tecnólogo en Energías Renovables. Semestres 1° al 6°

Ingeniería en Energías Renovables	
ÁREA DE DOMINIO	COMPETENCIA
ÁREA 4: Diseño y optimización de sistemas e instalaciones de generación de EERR con el fin de mejorar eficiencia energética, asegurando el cumplimiento de la normativa aplicable.	4.1. Definición y tecnificación de sistemas de EERR según requerimientos y necesidades de usuarios.
	4.2. Diseño y optimización de sistemas de EERR de acuerdo a estándares de calidad y procedimientos definidos por proveedores.
	4.3 Conservación e incremento de productividad de energía.
	4.4 Optimización de costos mediante el desarrollo de la eficiencia energética, considerando consumo y generación de energía.
ÁREA 5: Asesoramiento a empresas, industrias locales y tomadoras de decisión en el uso de EERR, tanto en lo tecnológico y medio-ambiental así como también en lo económico y legal.	5.1 Asesoramiento integral a nivel residencial y empresarial sobre productividad y sostenibilidad energética, atendiendo a principios éticos y legales.
	5.2 Asesoramiento a organismos públicos y privados en materia de generación, distribución y gestión de EERR.
ÁREA 6: Gestión de sistemas de EERR.	6.1 Aplicación de marcos legales y éticos al funcionamiento de un sistema de energía.
	6.2 Selección de tecnologías y procedimientos apropiados para el manejo de sistemas de energías renovables.
	6.3 Gestión de procesos y sistemas de energías renovables de acuerdo estándares nacionales e internacionales.
	6.4 Aplicación de técnicas de proyección económica, normas de seguridad y de medio ambiente, y normativa legal general para análisis de los sistemas de energías renovables.
ÁREA 7: Investigación, innovación y desarrollo de emprendimientos científicos, tecnológicos y de ingeniería en las áreas de competencia.	7.1 Colaboración en investigación e innovación orientada a desarrollar nuevos productos y/o conocimiento científico de relevancia.
	7.2 Conformación y gestión de equipos técnicos para investigación e innovación

Tabla 3. Competencias Título en Ingeniería en Energías Renovables. Semestres 7° al 10°

SISTEMA DE CRÉDITOS, RÉGIMEN DE ESTUDIOS, CALIFICACIÓN Y EVALUACIÓN

Sistema de créditos y régimen de estudios

El Plan de estudios (Resolución 395/17, 2017) se implementa en base a créditos, expresados en horas cronológicas, y de acuerdo con la carga semanal de actividades que deberá asumir un estudiante para lograr los objetivos de aprendizaje definidos en cada programa.

Cada crédito es equivalente a 15 horas cronológicas. Cada semestre tiene 18 semanas de actividad académica, de las cuales 2 semanas corresponden a evaluaciones. El régimen de estudio es presencial.

El Plan de estudios de la Ingeniería en Energías Renovables tiene una duración de 10 semestres, equivalentes a 446 créditos, de las cuales 3548 son horas de clase y 3142 horas autónomas del estudiante. Para el título intermedio de Tecnólogo en Energías Renovables corresponden a 278 créditos, con una carga de 2322 horas de clase y 1848 horas autónomas del estudiante.

Semestre	UNIDADES CURRICULARES (UC)*	Horas de clase	Créditos	Totales	
				Horas clase	Créditos

1°		Matemática I – Cálculo	72	10	366	48
		Física I - Mecánica	108	14		
		Álgebra	72	10		
		Introducción a las EERR	52	8		
2°		Matemática II	76	10	394	49
		Fundamentos de Electrotécnica	84	11		
		Física II – Electromagnetismo y Ondas	108	14		
		Fundamentos de Programación	64	8		
3°		Circuitos Eléctricos	80	10	398	48
		Termodinámica	128	14		
		Energía Mecánica	64	9		
		Conversión de Energía Solar	64	9		
4°		Mecánica de los Fluidos	74	10	370	46
		Tecnología de Medición y Control	42	6		
		Matemática Estadística Aplicada a Análisis de Datos Climáticos	80	10		
		Máquinas Eléctricas	80	10		
		Laboratorio de EERR I	32	4		
5°	Eólica	Proyecto de Energía Eólica I	64	7	402	43
		Electrónica	74	9		
		Sistemas de Energía Eólica	74	9		
		Seguridad Laboral y Salud Ocupacional en Sistemas de EERR	64	7		
		Práctica Profesional Curricular	64	5		
	Solar	Proyecto de Energía Solar I	64	7	402	43
		Electrónica	74	9		
		Sistemas de Energía Solar I – Térmica	74	9		
		Seguridad Laboral y Salud Ocupacional en Sistemas de EERR	64	7		
		Práctica Profesional Curricular	64	5		
6°	Eólica	Proyecto de Energía Eólica II	128	12	392	44
		Software/Simulación-Funcionamiento de Parques Eólicos	74	9		
		Laboratorio de EERR II –Eólica	32	4		
		Normativa Jurídica Aplicada a los Proyectos de EERR	32	6		
		Optativa	64	7		
	Solar	Proyecto de Energía Solar II	128	12	392	44
		Sistemas de Energía Solar II – Fotovoltaica	74	9		
		Laboratorio de EERR II – Energía Solar Fotovoltaica	32	4		
		Normativa Jurídica Aplicada a los Proyectos de EERR	32	6		
		Optativa	64	7		
7°		Acondicionamiento de Energía Eléctrica	88	12	302	39
		Métodos Numéricos	88	12		

	Matemática III	64	9		
8°	Automatización en Sistemas de Energía	74	10	328	44
	Generación Distribuida	80	11		
	Eficiencia Energética	64	9		
	Estudio económico del mercado de energía	48	8		
9°	Sistemas electrónicos para conversión de energía	74	9	338	40
	Gestión y organización de Proyectos	48	7		
	Instalaciones Eléctricas en EERR	80	9		
	Optativa	74	9		
10°	Proyecto de EERR 3	16	15	258	45
	Evaluación del Impacto Ambiental	32	6		
	Smart Grids	74	9		
	Optativa	74	9		

Tabla 4. Unidades curriculares por semestre. (*) El subtotal de horas y créditos mostrados de cada semestre tienen incluidos las cargas horarias de las unidades curriculares de Inglés y Programas Especiales, con 32 horas y 30 horas, y 4 créditos y 2 créditos, respectivamente. Dichas unidades curriculares se encuentran en igual carga horaria en cada uno de los diez semestres.

Sistemas de calificación

El docente puede utilizar cualquiera de los Sistemas de Calificaciones para evaluar los estudiantes en sus Unidades Curriculares (UC). En la Figura 6 se encuentran los seis sistemas descritos en la circular 008/DA/2018 (RC008, 2018).

Sistema	Descripción del Sistema de Calificación			
SCP 1	1º Evaluación 25%	2º Evaluación 35%	Evaluación Continua 40%	
SCP 2	1º Evaluación 30%	2º Evaluación 30%	Evaluación Continua 40%	
SCP 3	1º Evaluación 25%	2º Evaluación 35%	Laboratorio 20%	Evaluación Continua 20%
SCP 4	Participación en trabajo 70%		Trabajo entregado 30%	
SCP 5	Diseño de Proyecto 50%	Presentación de Proyecto 30%	Otras Actividades 20%	
SCP 6*	Actividades 60%		Participación 40%	

Figura 6. Sistema de Calificaciones. (*) Específico para Carreras Virtuales

Dentro de “Evaluación continua” y de “Otras actividades” el docente califica lo que estime pertinente (actuación en clase, trabajos prácticos, laboratorios, etc.) pudiendo subdividir ese criterio tantas veces como lo necesite; pero esa subdivisión no se registra en las actas.

Escala de calificaciones y nivel de logro aceptable

La escala de calificaciones va del 1 al 5. Se expresa en rangos correspondientes a niveles de logro que se detallan a en la siguiente tabla.

Calificación	Concepto	Rangos	% de logro
1	Deficiente	1.00 a 1.99	0% a 24%
2	Insuficiente	2.00 a 2.99	25% a 59%
3	Suficiente	3.00 a 3.99	60% a 69%
4	Muy Bueno	4.00 a 4.99	70% a 89%
5	Excelente	5.00	90% a 100%

Tabla 5. Escala de calificaciones y nivel de logro aceptable

La norma (RC008, 2018), adjunta una tabla de conversión de porcentaje de logro a calificación. Dicha conversión se expresa resumida en intervalos, en la columna “% de logro” de la Tabla 5.

Situaciones dadas al final del curso

Al final del curso, los estudiantes se encontrarán en algunas de las siguientes situaciones (Tabla 6)

Situación	Exoneración	Examen reglamentado	Tutoría	Recurso o examen único	Recurso
Calificación del Curso (CC)	4.00 a 4.99 Muy Bueno 5: Excelente	3.00 a 3.99 Suficiente	2.00 a 2.99 Insuficiente	1.01 a 1.99 Deficiente	1.00 Deficiente
Calificación Final de la UC (CF)	CF=CC	CF=70%(CC)+30%(Calificación examen). En el caso de carreras virtual la ponderación será 50/50	Se aprueba la Tutoría CF=70%(3 de la Tutoría) + 30%(Calificación Examen)	CF=CC o CF=Calificación del examen único	CF= Si recurso se califica en esta oportunidad

Tabla 6. Diversas situaciones que el estudiante se encontrará al finalizar el curso.

CONCLUSIONES

Al inicio del año lectivo de 2018, la carrera de Ingeniería en Energías Renovables cuenta con una matrícula compuesta de 103 estudiantes (19 de la cohorte 2016, 41 de la cohorte 2017 y 43 de la cohorte 2018). La matrícula tiene una tendencia clara de aumento en estos tres primeros años. Al final del 2018, la primer Cohorte completará el plan de estudios para Tecnólogo en Energías Renovables, la misma estará compuesta por un 50% en eólica y un 50% en solar.

La procedencia de los estudiantes es ampliamente mayoritaria del interior del país, principalmente de ciudades como Durazno, Paso de los Toros, Florida, Rivera, Paysandú, Minas de Corrales, Carmen, Trinidad, Maldonado, Salto, Bella Unión, entre otras ciudades, como también de Montevideo; evidenciado así la respuesta positiva a uno de los principales objetivos puestos en marcha por la UTEC: la ampliación de la oferta terciaria universitaria en el interior de Uruguay.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Profesora María Maqueira, a la Anl. Gisselle Fumero, a los funcionarios y autoridades del ITRSC, a los funcionarios y autoridades de UTEC, y a los estudiantes de las carreras en energías renovables de las primeras cohortes.

REFERENCIAS

Aguiar M. (2016). Informe de Creación de Carrera, Tecnólogo en Energías Renovables. Plan de Estudios Tecnólogo en EERR. UTEC. 9 de diciembre de 2016. Montevideo. Uruguay.

- B. Baptista, B. Martínez, V. Tenenbaum. (2014a). Relevamiento de Capacidades relativas a la Formación Terciaria en áreas claves para el desarrollo de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC) - Informe región centro-sur. Junio de 2014 Montevideo, disponible en el sitio web <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/wordpress-utec/uploads/2017/08/relevamiento-de-capacidades-relativas-a-la-formacion-terciaria-en-areas-claves-para-el-desarrollo-de-la-utec-region-centro-sur.pdf>
- B. Baptista, B. Martínez, V. Tenenbaum. (2014b). Relevamiento de Capacidades relativas a la Formación Terciaria en áreas claves para el desarrollo de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC)- Informe región norte. Octubre de 2014. Montevideo, disponible en el sitio web https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/wordpress-utec/uploads/2017/08/dt-02_14c_n-region-norte.pdf
- B. Baptista, V. Tenenbaum. (2013a). Relevamiento de Capacidades relativas a la Formación Terciaria en áreas claves para el desarrollo de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC) - Segundo Informe de Avance. Noviembre de 2013. Montevideo, disponible en el sitio web https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/wordpress-utec/uploads/2017/08/dt-02-13_relevamientocapacidades.pdf
- B. Baptista, V. Tenenbaum. (2013b). Relevamiento de Capacidades relativas a la Formación Terciaria en áreas claves para el desarrollo de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), Primer Informe de Avance. Junio de 2013. Montevideo, disponible en el sitio web https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/wordpress-utec/uploads/2017/08/dt-01-13_relevamientocapacidades.pdf
- BEN. (2017) Balance Energético Nacional. Balance Preliminar 2017. Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, disponible en el sitio web: <http://www.ben.miem.gub.uy/>.
- Ley 18.437 (2008). Ley General de Educación. Promulgación en Parlamento Nacional el 12/12/2008. Uruguay, disponible en el sitio web: <http://www.impo.com.uy/bases/leyes/18437-2008>
- Ley 19.043. (2012) Creación de la Universidad Tecnológica (UTEC). Promulgación en Parlamento Nacional el 28/12/2012. Uruguay, disponible en el sitio web: <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/19043-2012>
- MIEM. (2017). Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay. Mapas Energéticos, disponible en el sitio web: <http://www.miem.gub.uy/energia/mapas-energeticos>
- Olivet, B. (2014). Informe: Medio Ambiente y Energía en Uruguay. DNE, DINAMA y AECID. 04/14 RES 395/17. (2017). Resolución 395/17 que describe el Plan 2018 de la Carrera Ingeniería en Energías Renovables. UTEC. 31 de agosto de 2017. Montevideo. Uruguay, disponible en el sitio web: <https://utec.edu.uy/ingenieria-en-energias-renovables/>
- RC008 (2018). Referencia Circular 008/DA/2018. De las Normas de Evaluación y Calificación, registro de Inasistencias. 15 de junio de 2018. Montevideo. Uruguay.
- REN21. (2016). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. «Renewables 2016 – Global Status Report,» disponible en el sitio web: www.ren21.net
- EUCO 169/14 (2014). Conclusiones del Consejo Europeo, 23 y 24 de Octubre de 2014, disponible en el sitio web: <http://www.consilium.europa.eu/es/meetings/european-council/2014/10/23-24/>

ABSTRACT: The Technological University of Uruguay (UTEC) is a public education initiative with a technological profile that expands the university offer to the Uruguayan provinces, promoting the link with the industry and the social and cultural development of the country. The Renewable Energy Engineering program was launched in 2016 in the city of Durazno. This university course consists of ten semesters. In the sixth semester the student obtains an intermediate degree as a Renewable Energies Technician (Option: Wind Energy or Solar Energy). The creation of this university program responds to the needs arising from the rapid and significant technological transformation that Uruguay has been experimenting in the field of renewable energies. The aim of the program is to train professionals in the implementation and maintenance of renewable energy generation facilities, and to conduct research in order to contribute to the future development of the country, with a graduate profile based on competencies.

Keywords: education, renewable energy, solar energy, wind energy, technologist.

APLICACIÓN DE LOS INDICADORES DE REFERENCIA “WASTEAWARE” PARA EL DIAGNÓSTICO DEL RENDIMIENTO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL CONSORCIO CACHI- PAYOGASTA (SALTA).

Villafañe¹, F.A., y Manrique², S.M.

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta – Avda. Bolivia 5150, A 4408 FVY Salta, Argentina
Tel.: 0387-4255533 – E-mail: flo_a8@hotmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 18/09/18

RESUMEN: La regularización de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (GiRSU) resulta importante a nivel mundial, a fin de minimizar impactos ambientales y sociales en las comunidades. Sin embargo, en general los tomadores de decisión no cuentan con un diagnóstico de GiRSU que permita direccionar y monitorear los avances en la gestión. Este fue el objetivo del presente. Se trabajó con la metodología internacional “Wasteaware”, mediante la aplicación de entrevistas semi-estructuradas y encuestas. Se define una línea de base para dos municipios, proporcionando información para priorizar los recursos disponibles para la mejora de los servicios; identificar los puntos fuertes a consolidarse y los puntos débiles que deberían abordarse, juzgando su propio desempeño. Los resultados posibilitarán direccionar la toma de decisiones para la optimización de GiRSU. Se brinda una matriz dinámica que puede ser actualizada periódicamente y constituye una herramienta práctica para monitorear la evolución de los sistemas en el tiempo.

Palabras claves: gestión integral, indicadores de sustentabilidad, municipio, residuos.

INTRODUCCIÓN

Contexto de generación de residuos a nivel mundial

Desde su aparición y al igual que las demás especies, el hombre produce residuos; pero a diferencia de éstas, el tipo de residuo que genera (en particular materiales sintéticos desarrollados en décadas recientes) es de difícil asimilación por los ciclos naturales del planeta; a lo que se suma que la tasa de generación de los mismos supera la tasa de degradación del sistema natural, resultando en una acumulación en el suelo (MAyDS, 2016). La explosión demográfica y la creciente urbanización reflejada en el aumento del consumo y por lo tanto, en la producción de residuos, han impulsado su generación alcanzando niveles críticos en la actualidad (UNPE, 2015).

La cantidad y el tipo de residuos que genera una persona, ciudad, país o región, están fuertemente relacionados con el nivel de ingreso. Países como Kuwait, Sri Lanka y algunos países de América anglosajona, están entre los de mayor tasa de generación per cápita mundial, con un promedio de entre 5 y 6 kg por habitante y por día. En el otro extremo, países de África, Asia y Latinoamérica, muestran un promedio entre 0,1 y 0,3 kg por habitante por día (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012).

Los sistemas de gestión de residuos en el mundo son muy variados, ya que dependen directamente del nivel socio-económico de los países. Esto lleva a que existan, tanto sistemas sofisticados, eficientes y de altos costos de inversión, como sistemas más sencillos en países en desarrollo. La experiencia a nivel mundial indica una tendencia hacia sistemas de gestión cada vez más complejos y eficientes. La Unión Europea, a través de una legislación eficiente e instrumentos financieros, logró que los países que la conforman implementen distintos sistemas de gestión de residuos que permiten, hoy en día, disminuir la generación y disposición final de los mismos, como así también aumentar el

¹ Consultora independiente

² Investigadora CONICET.

aprovechamiento de las fracciones valorizables. Así, en los últimos 20 años (1995-2015) se observa una disminución de la cantidad de residuos que se vierten en un vertedero (-58%) y el aumento en el compostaje (+184%), reciclado (+176%) e incineración (+99%) (EUROSTAT, 2015). El hecho de que estos países cuenten con datos de generación y tratamiento permite un control y diagnóstico de la gestión que implementan para poder mejorarla a medida que siguen creciendo.

Por otra parte, las prácticas de eliminación más utilizadas en la mayoría de los países en vía de desarrollo, son la quema y el vertido de desechos en sitios inapropiados a cielo abierto (UNPE, 2015). Estas prácticas dan lugar a importantes riesgos en la salud pública y el medio ambiente, contaminando el suelo a través de los lixiviados que se generan debido a la descomposición de los residuos, y que llegan a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, alterando sus características. Además, la degradación de la fracción orgánica de estos residuos genera metano que es emanado hacia la atmósfera. Este gas es clasificado dentro del grupo de los gases de efecto invernadero (GEI) como “supercontaminante” ya que posee un poder de calentamiento global (PCG), 28 veces mayor que el del dióxido de carbono (gas más abundante en la atmósfera) (IPCC, 2013). En este contexto resulta fundamental visibilizar la situación de la gestión de residuos a nivel municipal, ya que son las unidades políticas responsables de la administración de los mismos, a fin de planificar una correcta gestión en cada jurisdicción.

La gestión de RSU a nivel nacional y provincial

Los sistemas de gestión de residuos, para poder ser implementados en los distintos niveles organizativos, deben estar enmarcados dentro de las leyes y normas específicas que los regulen. En Argentina, según la ley Nacional 25916/04, de presupuestos mínimos de protección ambiental para la GIRSU (Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos) se denomina Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a aquellos elementos, objetos o sustancias generados y desechados producto de actividades realizadas en los núcleos urbanos y rurales, comprendiendo aquellos cuyo origen sea doméstico, comercial, institucional, asistencial e industrial no especial asimilable a los residuos domiciliarios. Quedan excluidos aquellos residuos que se encuentran regulados por las Leyes N°: 11.347 (residuos patogénicos, excepto los residuos tipo “A”), 11.720 (residuos especiales), y los residuos radioactivos. Según esta misma Ley, la GIRSU es el Conjunto de operaciones que tienen por objeto dar a los residuos producidos en una zona, el destino y tratamiento adecuado, de una manera ambientalmente sustentable, técnica y económicamente factible y socialmente aceptable. La gestión integral comprende las siguientes etapas: generación, disposición inicial, recolección, transporte, almacenamiento, planta de transferencia, tratamiento y/o procesamiento y disposición final.

En Salta, el 78% de los municipios disponen en un basural a cielo abierto (BCA) y el 22% restante dispone en un relleno sanitario ya sea controlado, medianamente controlado u operando de manera inadecuada (SAyDS, 2016). La Ley Provincial 7070, determina la responsabilidad de los municipios de regular los residuos generados por los mismos (art. 105) y establece una estrategia de implementación siguiendo la estrategia nacional de los GIRSU (regionalización). Los municipios pioneros en la implementación de GIRSU fueron aquellos con el suficiente ingreso para hacer frente a inversiones en tecnologías de alto costo (Bs As, Santa Fe, San Juan), destacándose algunos de ellos como modelos de gestión para los demás municipios de menor desarrollo económico y social. La provincia también está trabajando en la implementación de GIRSU. Dentro de la estrategia provincial de GIRSU, los municipios se agruparon en 14 regiones, existiendo a la fecha solo 3 de manera formal. Uno de estos últimos es el de “Valles Calchaquíes 2”, conformado por los municipios de Cachi y Payogasta.

En el contexto descripto, resulta prioritario que los municipios que se están articulando mediante consorcios, cuenten con un diagnóstico de la situación actual de la gestión de los RSU en cada municipio, a fin de poder planificar metas alcanzables y direccionar adecuadamente los esfuerzos y los recursos para el beneficio de la comunidad. Este fue el objetivo del presente. Se trabajó con el método internacional “Wasteaware”, mediante la aplicación de entrevistas semi-estructuradas y análisis de información primaria y secundaria. Se define una línea de base para los dos municipios del Consorcio Valles Calchaquíes 2, proporcionando información para priorizar los recursos disponibles y así lograr la mejora de los servicios; identificando los puntos fuertes a consolidarse y los puntos débiles que

deberían abordarse, juzgando cada municipio su propio desempeño. Los resultados posibilitarán direccionar la toma de decisiones para la optimización de GiRSU. Se brinda una matriz dinámica que puede ser actualizada periódicamente y constituye una herramienta práctica para monitorear la evolución de los sistemas en el tiempo. Asimismo, dado que el método incluye indicadores estandarizados, es posible observar la situación de los municipios estudiados con respecto a otros a nivel mundial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los municipios de Cachi y Payogasta, pertenecen al departamento de Cachi, provincia de Salta (Latitud: 25° 5'20.10"S y Longitud: 66° 8'1.23"O), el cual se caracteriza por tener un clima semiárido de altura y árido de sierras y bolsones, con precipitaciones estivales (163 mm anuales) y temperaturas que oscilan en verano entre los 20°C y 35°C y en invierno entre 5°C y 15°C. El suelo es de escaso desarrollo, con texturas desde arenosas hasta franco limosa (Zelarayán, 2015). Geomorfológicamente se caracteriza por ser un valle inter-montano elevado de orientación norte-sur recorrido por el río Calchaquí. La vegetación de la región es representativa de las provincias fitogeografías de Monte y Prepuna. La superficie aproximada abarcada por el departamento de Cachi es de 2.925 km². Cuenta con una población total de 7315 personas (INDEC, 2010).

Relevamiento de información de base

Se aplicaron tres técnicas de recopilación de información:

- a) relevamiento de información secundaria (revisión y análisis de documentos, registros de datos en bruto, informes, etc.) y primaria (observación participante, registro fotográfico)
- b) entrevista a actores clave, a fin de relevar aspectos del sistema de gestión.
- c) encuesta a la población, a fin de conocer su percepción sobre el sistema e interés en la gestión

Se realizaron dos viajes a cada una de las localidades bajo estudio: la primera en la estación de otoño, donde se visitaron los sitios de disposición final, organismos municipales, establecimientos educativos, hospitales y comercios de ambos municipios. La segunda instancia se llevó a cabo en primavera, particularmente para recabar información que no se pudo obtener anteriormente. En estos viajes se relevó información general, denominada información de apoyo, con respecto a la localidad, sus estructuras administrativas, la relación con su región más amplia, las fuentes de información, como así también los datos relacionados con los desechos. Se revisó documentación existente, facilitada por organismos públicos (ordenanzas municipales, diagnósticos de la gestión y encuestas elaborados por SAyDS) para estimar la "línea de base" o de partida de ambos municipios en la situación actual.

En las entrevistas se identificaron aspectos sobre el circuito actual de gestión, los recorridos y puntos de traslado, las condiciones y características, maquinaria, mano de obra, los actores involucrados y las diferencias entre zona urbana y rural. Los actores claves seleccionados fueron: a) usuarios del servicio: generadores domiciliarios en la zona urbana y rural, grandes generadores, instituciones y organismos públicos y b) proveedores del servicio: en este caso particular, solo el municipio. Se realizaron en total 20 entrevistas. Las encuestas se aplicaron a 64 hogares en Cachi (definidos de manera aleatoria) y a 33 hogares en Payogasta. Las tres técnicas de relevamiento de información posibilitaron realizar el diagnóstico del Consorcio en cuanto a la gestión de RSU existente al momento de realizar esta investigación.

Diagnóstico del Consorcio: herramienta metodológica empleada

EL método "Wasteaware" es una herramienta utilizada para evaluar, de manera estandarizada, el rendimiento o la calidad del sistema de gestión de residuos realizado en una localidad (ciudad, comunidad, municipio), independientemente del nivel de ingreso de la misma, que se basa en un conjunto de indicadores de referencia. Además, proporciona información para la toma de decisiones, ayudando a priorizar los recursos financieros limitados, identificando los aspectos que deben atenderse de manera inmediata y los que deben seguir fortaleciéndose (Wilson et al., 2014). El marco analítico distingue 2 dimensiones: a) física y b) de gobernanza (Fig. N° 1), cada una conteniendo diferentes componentes.

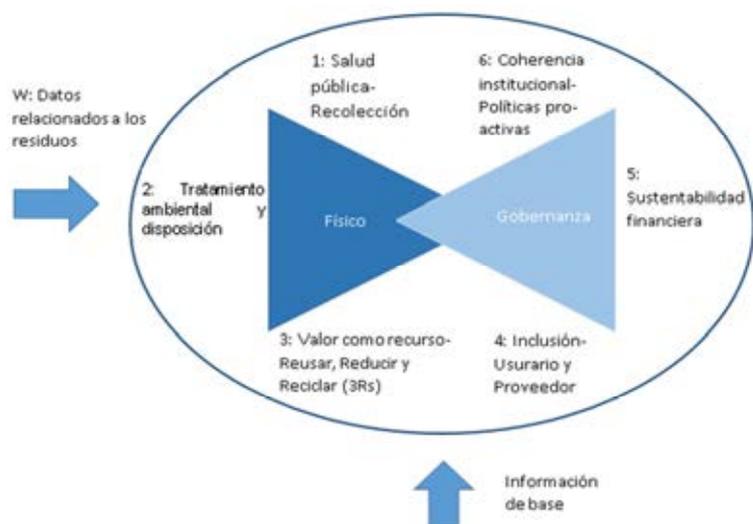


Figura 1. Esquema de marco analítico del método Wasteaware

El primer triángulo se enfoca en 3 componentes físicos necesarios para el manejo de RSU (Wilson, 2007):

- la protección de la salud pública que depende de un buen servicio de recolección,
- la protección del medio ambiente relacionado con el tratamiento y la eliminación de los RSU,
- el valor de residuo como recurso (3R: reducir, reciclar y reutilizar).

El segundo triángulo se enfoca en las estrategias de gobernanza para lograr un buen funcionamiento del sistema y está integrado por 3 componentes:

- la inclusividad, tanto del usuario del servicio de gestión de RSU como quien provee dicho servicio (ésta misma se podría considerar como una tercera dimensión que rodea a las dos dimensiones mencionadas anteriormente) (Wilson, et al., 2015).
- sostenibilidad financiera, además de ser sustentable debe ser rentable,
- instituciones sólidas y políticas proactivas.

Como muestra la Fig. N°1, además de las 2 dimensiones detalladas, se trabajó con datos relacionados a los residuos (cuantificación y caracterización). Los datos de generación de residuos se estudiaron en Villafañe et al (2018), no existiendo otras fuentes de información a la fecha. Cada uno de estos componentes a su vez, se dividen en cuantitativo y cualitativos. Los primeros son medidos u observados directamente a campo, mientras que los cualitativos son determinados por una serie de atributos que son calificados (de 0 a 5, 10, 15 o 20) dependiendo del grado de cumplimiento de cada atributo- Luego son sumados y el número obtenido es el que finalmente se usa para medir el rendimiento del indicador. El rendimiento de cada indicador se clasifica según una escala o rango de valores en porcentajes, ajustados de acuerdo a la característica de cada indicador, ya que no es lo mismo, un 30% en la cobertura de recolección (rendimiento bajo) que el mismo valor para la tasa de reciclaje, resultando en un rendimiento medio. Además de expresar los resultados numéricamente, se expresan mediante una codificación de colores semáforos que permite una fácil interpretación de los resultados (Wilson et al. 2014).

BAJO	
MEDIO/BAJO	
MEDIO	
MEDIO/ALTO	
ALTO	

Tabla 1 Codificación de semáforo para expresar el rendimiento de cada indicador según el valor obtenido

Propuestas para la optimización de la gestión en el Consorcio

El conjunto de información generada permitió identificar claramente los aspectos fundamentales que deberían considerarse para mejorar la situación actual del sistema de gestión en el consorcio estudiado. Se detectaron aspectos que funcionan bien, los deficientes y aquellos susceptibles de intervención para su optimización. Las propuestas se realizaron teniendo en cuenta la realidad de la región, la zona, la población y en particular de los municipios, considerando objetivos o metas a alcanzar a corto y largo plazo factibles de ser logradas. Se comparó la gestión actual con gestiones de otros municipios en otros países, permitiendo una mirada comparativa y global que permite dimensionar la situación de los sistemas estudiados.

RESULTADOS

Diagrama de flujo de la gestión actual por municipio

Se identificaron los siguientes eslabones en la cadena de gestión actual de RSU en los municipios: (a) Generación de RSU; (b) recolección y transporte; (c) disposición final y (d) Recuperación de alguna naturaleza (reciclado, alimentación animal, etc.). El primer eslabón de la cadena está representado por dos tipos de generadores, tanto en la zona rural como en la urbana: los domiciliarios (viviendas particulares) y los grandes generadores (comercios, las escuelas, el hospital y hosterías). Estos inician el flujo de residuos dentro del sistema de gestión y de ellos depende el tipo de residuo a ser aprovechado o valorizado. Del total que se genera, una gran proporción logra ser recolectada y transportada por el servicio prestado por el municipio (capturada por el sistema), mientras que otra proporción se pierde en forma de quema, entierro o alimento de animales -entre otras- por parte de los mismos generadores.

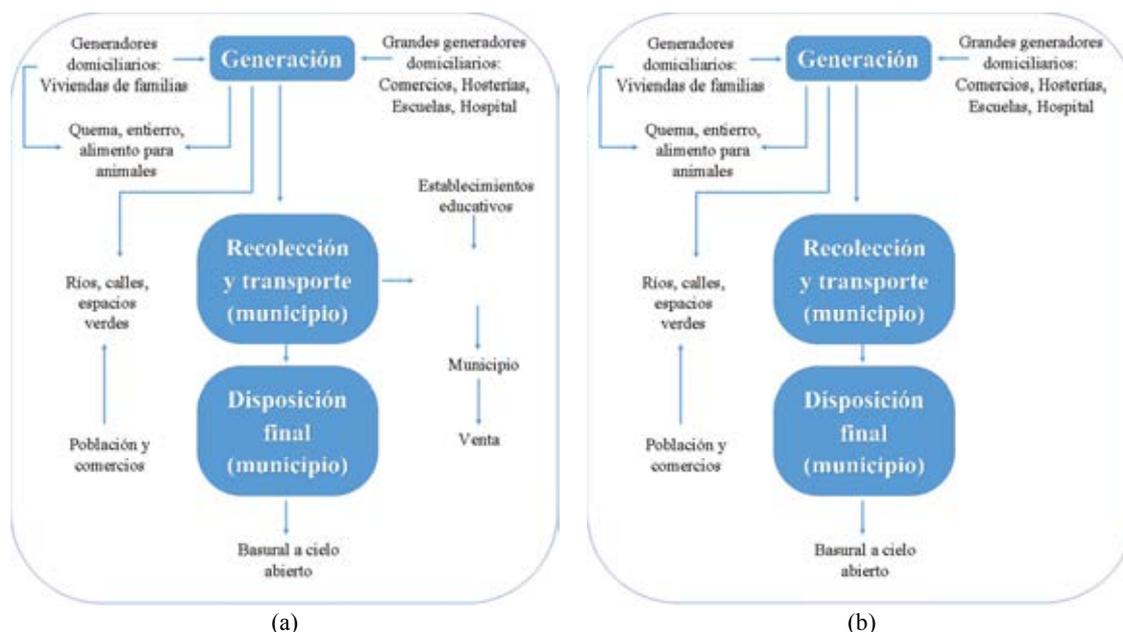


Figura 2 Diagrama de flujo del residuo dentro de la gestión del municipio de (a) Cachi y (b) Payogasta.

El residuo que queda dentro del circuito de recolección y transporte, una parte continúa a disposición final, mientras que otra sale fuera, a través de la actividad del reciclaje por parte de los establecimientos educativos y por el propio municipio que además vende dicha fracción. El resto del residuo que sigue dentro del sistema llega al basural a cielo abierto o sitio de disposición final, donde es enterrado y controlado con una baja frecuencia. Existe un circuito diferente al convencional, en donde los RSU saltan todo el sistema de gestión, y desde la generación directamente pasan a ser depositados en vertederos no autorizados o en lugares inapropiados. El flujo del residuo en el municipio de Payogasta llega a ser idéntico al de Cachi, excepto que no existe una fracción que sea reciclada.

Diagnóstico de la gestión actual de los RSU en los municipios

La aplicación del método Wasteaware arroja el siguiente cuadro de situación para cada municipio (se muestran solo parte de los resultados por limitación de espacio):

N°	Categoría	Indicador	Resultados	
			Cachi	Payogasta
Municipio			Cachi	Payogasta
Información general sobre la ciudad				
B1	Nivel de ingreso país	Categorías Banco Mundial	Medio-alto	Medio-alto
		Ingreso nacional bruto per cápita	206.2003 (pesos) (método atlas)	
	I. provincial	Categorías de ingreso	Bajo	Bajo
	Ingreso municipal	Categorías de ingreso	Bajo	Bajo
B2	Población	El ingreso bruto per cápita	\$ 0-17000 (pesos)	\$ 0-17000 (pesos)
		Población total ciudad (INDEC 2010, proyección 2016)	1.351.878	
		Población departamental (INDEC 2010, proy. 2016)	7.599	
Componentes físicos				
1.1	Salud pública-recolección de residuos	Cobertura de recolección	70%	64%
1.2		Residuos capturados por el sistema	66%	0%
1C		Calidad del servicio de recogida de residuos	65% (M/A)	30% (M/B)
2	Control ambiental - tratamiento y eliminación de residuos	Tratamiento y eliminación controlados	0%(B)	0%(B)
2E		Grado de protección ambiental en el tratamiento y eliminación de residuos	45% (M)	25% (M/B)
3	Gestión de recursos - 3R	Tasa de reciclaje	0,34%(B)	0%
3R		Calidad de 3Rs - Reducir, reutilizar, reciclar - provisión	25%	5%
Factor de gobernanza				
4U	Inclusividad	Inclusión del usuario	25%	20%
4P		Inclusión del proveedor	0%	0%
5F	Sostenibilidad financiera	Sostenibilidad financiera	35%	20%
6N	Instituciones sólidas, políticas proactivas	Adecuación del marco nacional de ordenación sostenible de los recursos	55%	50%
6L		Coherencia institucional local	50%	35%

Tabla 2 Resultados de los indicadores Wasteaware por municipio. El porcentaje de cobertura de ambos municipios, resultó de promediar los valores estimados tanto en la zona rural como en la urbana (M/A: medio alto, M: medio, M/B: medio bajo, B: bajo).

Considerando los resultados obtenidos para los indicadores cualitativos, se muestra un resumen comparativo para ambos municipios en la Figura N° 3:

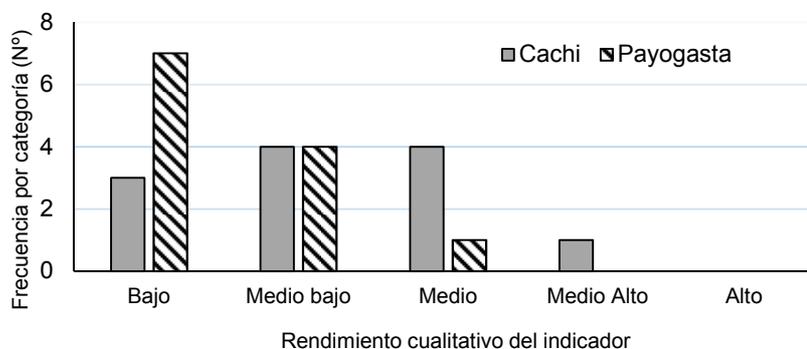


Figura 3 Distribución en categorías para los 12 indicadores utilizados para cada municipio

³ <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GNP.PCAP.CD?locations=AR3>

A primera vista, para ninguno de los dos municipios, el rendimiento de algún indicador considerado alcanza la categoría de “alto”. Existen más indicadores en categoría de “bajo” rendimiento en el municipio de Payogasta. Sin tener en cuenta el municipio, la mayoría de los indicadores estudiados se ubican en las categorías de menor rendimiento o rendimiento más deficiente (bajo, medio bajo, medio).

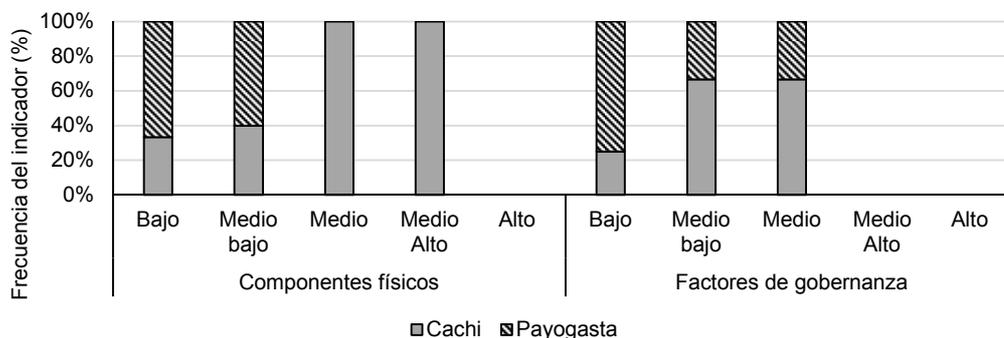


Figura 4 Frecuencia de los indicadores de los componentes físicos y de gobernanza, en ambos municipios.

Si se consideran los dos grupos de indicadores cualitativos: “componentes físicos” y “factores de gobernanza”, puede notarse que, en términos generales, Payogasta tiene una mayor frecuencia de indicadores con rendimientos bajos en ambos grupos, pero los componentes físicos muestran peor rendimiento. Para Cachi, existen indicadores con mejor rendimiento en este aspecto, mientras que los “factores de gobernanza” se distribuyen con rendimientos más deficientes en las categorías inferiores. En un análisis de mayor detalle, el rendimiento de tres indicadores en el municipio de Cachi, es “bajo” (casilla de color rojo completo), representando tres aspectos sin atender, que son: tratamiento y eliminación controlados, tasa de reciclaje e inclusión del proveedor. Se detectan cuatro aspectos pobremente atendidos, con un rendimiento clasificado como “medio bajo” (casilla rojo/naranja): residuos capturados por el sistema, calidad del sistema de reciclaje 3R, inclusión de usuario y sostenibilidad financiera. Cuatro aspectos “medianamente atendidos” cuyo rendimiento se clasifica como “medio” (naranja): cobertura de recolección, grado de protección ambiental en el tratamiento y eliminación de residuos, adecuación del marco nacional de ordenación sostenible de los recursos y coherencia institucional. Se destaca un aspecto que tiene un rendimiento “medio alto” (naranja/verde), que es la calidad del servicio de recolección; pero no existe ninguno cuyo rendimiento pueda catalogarse como “alto” (verde).

En el caso del municipio de Payogasta, el rendimiento es deficiente (categoría “bajo”) para una mayor cantidad de indicadores, siendo siete (7) los aspectos sin atender (rojo): residuos capturados por el sistema, tratamiento y eliminación controlados, tasa de reciclaje, calidad del sistema de reciclaje 3R, inclusión del usuario, inclusión del proveedor y sostenibilidad financiera. Existen en dicho municipio cuatro (4) aspectos poco o medianamente atendidos, que logran una clasificación de “medio bajo”: cobertura de recolección, calidad del servicio de recolección, grado de protección ambiental en el tratamiento y eliminación de residuos y coherencia institucional. Con un rendimiento “medio” se encuentra el indicador de adecuación del marco nacional de ordenación sostenible de los recursos. El municipio no posee ningún aspecto bien atendido (o “medio alto”) ni tampoco un indicador que alcance la clasificación de “alto rendimiento”.

El diagrama de radar (Fig.5) es una representación gráfica de lo que en la Tabla N° 3 se expresa en celdas de colores (verde, naranja y rojo). El mismo ayuda a relativizar un sistema sobre el otro. Se entiende que, a mayor superficie cubierta uniformemente, mayor eficiencia del sistema de gestión. Es por ello, que se puede apreciar que con respecto al municipio de Payogasta, el municipio de Cachi, tiene un sistema de gestión de residuos más eficiente.

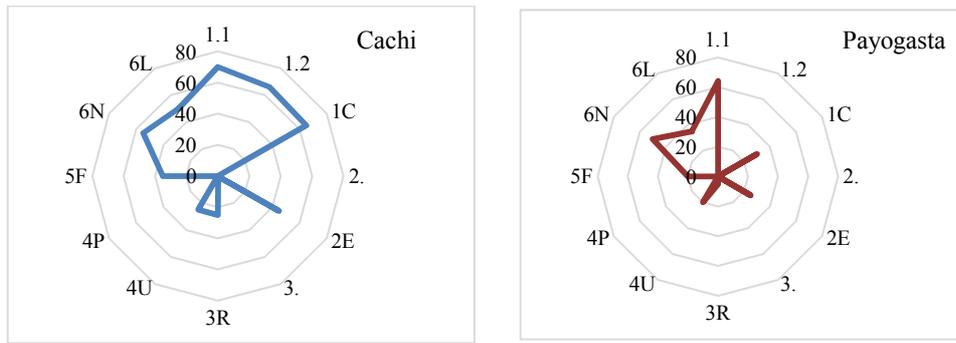


Figura 5 Diagrama visual del estado del sistema de gestión de RSU en cada municipio: Cachi (izquierda) y Payogasta (derecha). Los indicadores incluidos en la imagen se describen en la Tabla 2.

ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES

Situación de los municipios con respecto a otros a nivel mundial

Un problema importante en la gestión internacional de RSU es la falta de datos consistentes y la imposibilidad de comparación entre ciudades (Wilson et al., 2015). Por tanto, resultó de nuestro interés no solo conocer el estado actual de los municipios seleccionados para el estudio, sino también, generar una base de datos que permitiera observar su monitoreo a lo largo del tiempo; realizar comparación entre municipios para idénticos criterios, y evaluar comparativamente el desempeño de los municipios con respecto a otros a nivel mundial. EL método permite hacer esta comparación (Fig. 6).

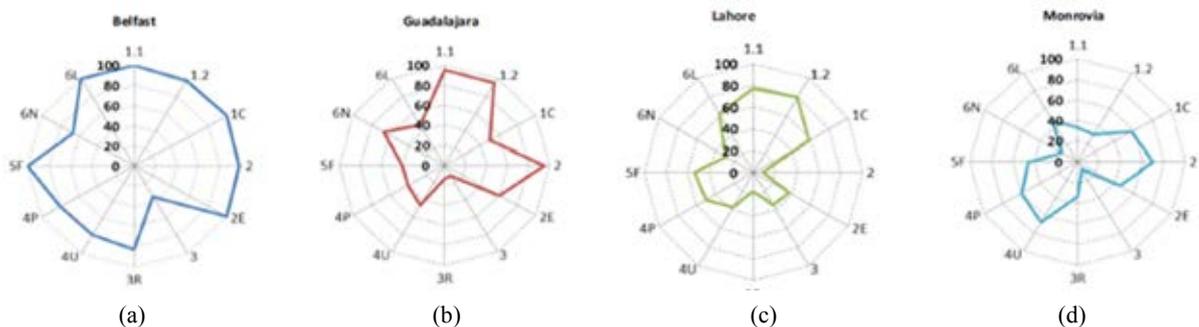


Figura 6 Rendimiento de los sistemas de gestión de RSU en otras ciudades del mundo aplicando Wasteaware : (a) altos ingresos; (b) ingresos medio-altos; (c) ingresos medio-bajos y (d) ingresos bajos (Wilson et al, 2015).

Se puede observar que el sistema de gestión del municipio de Cachi se asemeja más al de la ciudad de Guadalajara en cuanto al direccionamiento de esfuerzos, a pesar de que poseen algunas características distintas, como por ejemplo el aspecto socioeconómico. Guadalajara es una ciudad categorizada con ingresos medio-alto, donde su ppc es igual 1,2kg/hab/día a diferencia de Cachi un sitio con ingresos bajos y una ppc mucho menor. El municipio de Payogasta se asemeja más al sistema de la ciudad de Monrovia, ya que direccionan poco esfuerzo en mejorar la mayoría de sus aspectos. Lo cual es similar para casi todas las ciudades o localidades de bajos ingresos. Esta aproximación permite tener una idea de cómo podría ser la gestión de RSU, con solo conocer el nivel de ingresos de la localidad bajo análisis. Pero, además, cuando la “fotografía” del sistema muestra muy buen rendimiento en algunos indicadores, los análisis deben conducir a la identificación de las estrategias empleadas en dicha localidad para lograr tales rendimientos exitosos a fin de replicarlas en otras localidades.

En cuanto al circuito de gestión actual de los RSU (componentes físicos)

Partiendo de los puntos fuertes, débiles y ausentes identificados, se recomiendan las siguientes medidas generales del sistema que impactarán en los indicadores de la dimensión física.

Gestión actual	Medidas propuestas	Percepción local	Indicador
Sin segregación en origen y recolección indiferenciada	Segregación en origen: a) residuos sólidos “secos,” plástico, cartón, papel, vidrio, tetrabrik, metales, entre otros; y b) residuo “húmedo”, orgánico y otros. Recolección diferenciada. Aumentar la frecuencia y cobertura de recolección, alcanzando los barrios más alejados y de escasos recursos	Entre el 70 y el 95% de los encuestados (según municipio y sector urbano o rural) está dispuesto a separar sus residuos ya sea en contenedores localizados en esquinas o en el propio domicilio. Del 27 al 30% quema el residuo cuando no se realiza la recolección. Más de la mitad de la población deposita sus residuos en el piso, ya sean en bolsas plásticas, cajas, cajones.	Residuos capturados por el sistema
Transporte deficiente	Para el transporte de los residuos debe utilizarse un vehículo adecuado, impidiendo voladuras, lixiviados y disminuyendo la manipulación de los residuos por parte del personal recolector	Una pequeña proporción de habitantes confirmó la existencia de microbasurales. Casi la totalidad de la población tiene en claro los días de recolección. Aproximadamente el 30% está disconforme con el servicio de recolección.	Calidad del servicio de recogida de residuos
Baja o nula tasa de reciclaje. No hay presencia de recolectores informales. No presentan metas de reciclaje.	Alcanzar una tasa de reciclaje del 20%, proporción de los residuos aprovechables en relación al total generado	En ambos casos (municipios) la fracción orgánica resultó la más aprovechada por la población muestreada, seguida del plástico, luego la fracción otros y por último el cartón. En promedio el 60%	Tasa y calidad del reciclaje
Disposición en un basural a cielo abierto, con o sin ningún tipo de control.	Implementar un relleno sanitario o aumentar el control en los sitios de disposición actual, como así también el monitoreo del residuo que ingresa diariamente al sitio de disposición final.	En promedio el 60% confirmó realizar algún tipo de actividad para reducir la generación de los residuos (el uso de bolsas ecológicas, de envases retornables y el consumo de alimentos no envasados).	Tratamiento y eliminación controlados; Grado de protección ambiental en el tratamiento y eliminación de residuos

Tabla 3 Situación actual, percepción de la población y recomendaciones del sistema de gestión actual (indicadores del componente físico)

En cuanto a los aspectos de gobernanza

Gestión actual	Medidas propuestas	Percepción local	Indicador
No poseen algún derecho otorgado al usuario para ser escuchado, ni sistema de licitación del servicio.	Implementación de talleres ambientales y aplicación de encuestas, cuestionarios vía e-mail o llamadas telefónicas. Incluir en la normativa quiénes y cómo podrán llevar a cabo la prestación del servicio y dejar en claro los criterios para los procesos de licitación.	Los resultados afirmaron que aproximadamente entre el 60 y el 90% de la población estaría dispuesta a participar en talleres ambientales.	Inclusión del usuario y proveedor
No existe diferenciación en el monto de las tasas según el tipo de generador. Las normativas existentes no son específicas para la gestión de RSU.	Conocer y cuantificar los costos totales que implica el servicio de gestión de RSU. Calcular una tasa que permita cubrir los costos del servicio que se cobrará a cada generador. Prever líneas de financiamiento. Evaluar la mejor manera de informar los aspectos financieros de la gestión al pueblo. Creación de una normativa a nivel consorcio específica para la gestión de los RSU	Escaso conocimiento de los costos totales de la GIRSU por parte de proveedores y usuarios (municipios y población).	Sostenibilidad financiera
No existe una organización o departamento específico para la gestión de RSU en ningún nivel jerárquico. La mayoría del personal responsable de la gestión no posee capacitación ni idoneidad sobre el tema. Existe acta de consorcio para comenzar a gestionar los RSU de manera conjunta. No se generan ni monitorean dichos datos. Existe una legislación y estrategias de GIRSU nacionales y provinciales.	Crear un área o departamento específico para la gestión de residuos. Realizar capacitaciones al personal actual o incluir profesionales especializados en el área de gestión. Monitoreo o control de datos.	s/d	Adecuación del marco nacional de ordenación sostenible de los recursos y coherencia institucional y local

Tabla 4 Situación actual, percepción de la población y recomendaciones del sistema de gestión actual (gobernanza)

Recomendaciones generales para optimización de la gestión en el Consorcio

Otros aspectos generales que debería considerar el Consorcio son:

- Generación de información diagnóstica:

La generación de información local es fundamental para el diseño de cualquier plan de gestión. Los datos recabados posibilitarán adecuadas estimaciones para el dimensionamiento de las etapas de la gestión, que en caso de no generarse correctamente o no existir, pueden llevar a un sobre o subdimensionamiento, incurriendo así en gastos innecesarios por parte del municipio.

- Aspecto legal:

Una de las alternativas de aprovechamiento de la fracción orgánica (Villafaña et al., 2018), podría ser la captura del biogás mediante la disposición de los RSU en un relleno sanitario del Consorcio. Para esto, será necesario contar con un estudio de impacto ambiental aprobado, en el cual se determinarán alternativas de localización del relleno sanitario (RS). El predio a destinar para este fin deberá contar con una infraestructura adecuada:

- Un portón de acceso, que deberá mantenerse cerrado y solo se abrirá para el ingreso del vehículo recolector.
- Casilla de control de acceso, esto permitirá tener registro de la entrada y la salida de los camiones recolectores y restringirá el paso a toda persona ajena al lugar como así también el ingreso de cualquier animal.
- El cercado, que deberá tener alambrado olímpico perimetral como lo tiene hoy en día el municipio de Cachi.
- Báscula, es de suma importancia el pesaje de los camiones al ingresar al predio, esto permitirá llevar un control de la cantidad de residuo que ingresa al predio por unidad de tiempo (día, mes, año). Mediante los datos de producción de residuos en ambos municipios, se logrará dimensionar una planta clasificadora. Los resultados provistos por Villafaña et al (2018) hacen factible la separación y aprovechamiento del plástico, cartón y papel.

- Control y supervisión:

Se debe alcanzar un alto nivel de control. Para ello se registrará no solo el peso de los camiones, sino la composición de los desechos al ingresar al predio; el personal supervisará que la descarga del residuo se lleve de manera correcta en la zona designada y que estos sean del tipo domiciliarios y no peligrosos u especiales; se realizará la limpieza de los vehículos de recolección antes de abandonar el predio. Es importante planificar la prevención de incendios en el lugar. De la misma manera que en la etapa de recolección se implementarán los mismos controles de salud y seguridad al personal a cargo dentro del sitio de disposición final. Una vez que los residuos fueron procesados en la planta de clasificación, se registrarán los pesos y el volumen de cada fracción separada. Es importante manejar el porcentaje de residuos generados que se recicla (tasa de reciclaje). El consorcio planteará y concretará metas de reciclaje año a año. El resto de las fracciones no aprovechables y descartadas se destinará a un relleno sanitario. Este RS puede variar de acuerdo al modo de disposición final que el consorcio decida realizar. Es de índole obligatoria la complementación a nivel municipal de la legislación nacional y provincial en gestión de residuos y la implementación de la misma antes de comenzar con la planificación de un sistema de gestión integral.

CONCLUSIONES

Se resalta la importancia de la generación de datos a partir de la realización de estudios locales específicos antes de implementar cualquier tipo de políticas de gestión, ya que sin datos no se puede conocer el nivel de gestión en relación al resto de la provincia, país o mundo. Tampoco se puede monitorear avances o retrocesos en función de las medidas implementadas. Es decir, el diagnóstico y el objetivo perseguido, definirán el punto de partida y el punto de llegada, que orientarán el camino a recorrer en cada municipio o Consorcio, para la optimización de la gestión de los RSU, con todos los beneficios que ello implica. Es fundamental incluir a la población en los procesos de planificación, ya que se ha manifestado un alto nivel de desconocimiento en el tema, como así también, falta de conciencia ambiental (incluyendo a los operarios), y considerando que su participación es el eslabón sobre el cual se hará la optimización de la gestión de RSU para el consorcio. Por otro lado, se ha podido observar claramente que es necesario regularizar la actual gestión, y que, para ello, en primera instancia, no se necesita de grandes inversiones, ya que con el solo hecho de prestar mayor atención a los distintos aspectos propuestos por el método Wasteaware (físicos y de gobernanza) sería suficiente

para mejorar la calidad del servicio brindado a la población. Esto también se desprende de la falta de conocimiento, por parte del municipio, de la situación actual de la gestión, destinando los recursos hacia donde no los requiere el sistema. A partir de los resultados obtenidos se podrá alcanzar una mayor eficiencia del uso de los limitados recursos disponibles, con un evidente impacto en la calidad ambiental del Consorcio y un mayor bienestar social.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los pobladores del departamento de Cachi (Intendentes, Secretarios, otros actores sociales) por la predisposición para responder las entrevistas y participar comprometidamente para la consecución de este trabajo. A la Municipalidad de Cachi, por acompañar y facilitar la logística en la zona. A la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable y en especial, a la Ing Mónica Pasculli, por el apoyo brindado para el éxito de este proyecto.

REFERENCIAS

- Dirección General Europea (Eurostat), http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics. Visitada el 20/09/2017.
- Hoonweg, D y Bhada-Tata, P (2012). What a waste: Global review of solid waste management. World Bank, Washington DC, p. 81-83. www.worldbank.org/urban
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013 - Synthesis Report
- MAyDS, (2016). Informe del estado del ambiente de la República Argentina. Editorial Bs As.
- Observatorio Nacional para la GRSU:<http://observatoriorsu.ambiente.gob.ar/>
- Piñero, F. (2011). La gestión de residuos sólidos en Tokio, París, Madrid Y México. Dialnet: pag 54
- Schübeler, P (1996) Conceptual Framework for Municipal Solid Waste Management in Low-income Countries. UMP/SDC Collaborative programme on Municipal Solid Waste Management in Developing Countries. Urban Management Programme (UMP) Working Paper Series, No. 9. St Gallen, Switzerland: SKAT.
- Soos, R., Whiteman, A. Wilson, D. Briciu, C.(2013). Operator Models – Understanding Local Objectives: Respecting Diversity. GIZ, Eschborn.<http://www.giz.de/en/downloads/giz2013-swm-operator-models-sourcebooken.pdf>
- UNEP and ISWA, (2015). Global Waste Management Outlook. Disponible en: https://www.unep.org/ietc/sites/unep.org.ietc/files/GWMO_summary_0.pdf
- Wilson. (2014). Supporting Information to ‘Wasteaware’ Benchmark Indicators for Integrated Sustainable Waste Management in Cities.
- Wilson, C. Rodic, L. (2015). Wasteaware’ benchmark indicators for integrated sustainable waste management in cities.
- Wilson DC (2007) Development drivers for waste management. Waste Management & Research 25(3): 198–207
- Villafañe, F (2018). Hacia una Gestión Planificada en el departamento de Cachi (Salta): Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos.
- Zaens, A. Urdaneta, J. (2014). Manejo de Residuos en America Latina y El Caribe, Redalyc: pag 125
- Zelarayán, A. y Fernández D. 2015. Línea de base ambiental y diagnóstico territorial. OT Alta Cuenca del Río Calchaquí. Salta - Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

ABSTRACT: The regularization of the management of urban solid waste (MSW), is important worldwide, due to the environmental and social complications that failure to do so entails. The biggest difficulty that the decision-making bodies in environmental policy must face is the lack of coherent data in the different hierarchical levels in charge of the management of the RSU. It was decided to apply the reference indicators "wasteware", in the municipality of Cachi and Payogasta, province of Salta. These allow to estimate both the performance of the management systems implemented in the different municipalities or cities, as well as the comparison between them, since they are standardized indicators, independent of the income level of the cities. The aspects that should be attended immediately were known and the performance of the current management between the two municipalities and with that of 5 different income cities was compared.

Key words: integral management, sustainability indicators, municipality, waste.

HACIA UNA GESTION PLANIFICADA EN EL DEPARTAMENTO DE CACHI (SALTA): CARACTERIZACION DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS

Villafañe, F.A., y Manrique, S.M.

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta – Avda.

Bolivia 5150, A 4408 FVY Salta, Argentina

Tel.: 0387-4255533 – E-mail: flo_a8@hotmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 18/09/18

RESUMEN: La regularización de la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) resulta fundamental a nivel mundial, ya que la gestión deficiente provoca efectos graves en la salud y el medio ambiente. La generación de datos confiables y sistemáticos es necesaria para proponer mejoras y facilitar la toma de decisiones en políticas ambientales. Por tanto, nuestro objetivo fue caracterizar los residuos que se generan en el departamento de Cachi, a fin de facilitar información de base que posibilite una adecuada planificación y gestión de los RSU. Mediante la aplicación de la metodología CEPIS (2005), se observó como resultado una clara predominancia de la fracción de orgánicos en relación al total de RSU (43% en promedio). La producción per cápita (ppc) para el municipio de Cachi fue de 0,21 kg/hab.día en la zona urbana residencial; 3,14 kg/hab.día para grandes generadores y de 0,15 kg/hab.día en la zona rural. En Payogasta se estimó un ppc de 0,7 kg/hab.día para zona urbana y de 0,55 kg/hab/día zona rural. Se estima el potencial energético de los RSU como uno de los beneficios de la implementación de una adecuada gestión en la zona, como así, el impacto ambiental derivado de la reducción de emisiones de gases efecto invernadero.

Palabras clave: Cachi y Payogasta, biogás, caracterización, residuos sólidos, energía térmica.

INTRODUCCIÓN

En un principio, el hombre llevaba una vida integrada con los ciclos naturales del planeta, por lo tanto, podía consumir los recursos que ésta le brindaba sin alterarlos ni limitarlos; mientras que los desechos que se generaban eran de fácil asimilación por el sistema natural (MAyDS, 2016). Esto cambió radicalmente desde la revolución industrial y el desarrollo científico y tecnológico, cuando la generación de residuos incrementó de manera exponencial y se introdujeron sustancias de difícil degradación en el medio natural (UNPE, 2015). Los residuos y desechos producto de la actividad humana comenzaron a acumularse, causando graves problemas sobre la salud pública y el ambiente, propiciando el desarrollo de vectores transmisores de enfermedades y la contaminación de suelos, aire, cuerpos de agua y los organismos que los constituyen. Los suelos contaminados por las materias extrañas provenientes de residuos disminuyeron la probabilidad de ser utilizados con fines agropecuarios. La contaminación atmosférica no solo trajo consecuencias locales, sino también impactos de mayor alcance mediante la acumulación de gases efecto invernadero responsables del sobrecalentamiento global (Zapata, 2011).

Los países desarrollados llevan estadísticas detalladas de la cantidad y el tipo de residuos que generan. Se estima que países como Kuwait, Sri Lanka y algunos países de América anglosajona, están entre los de mayor tasa de producción per cápita (ppc) mundial (kg de RSU generado por habitante por unidad de tiempo), con un promedio de entre 5 y 6 kg por habitante por día. En el otro extremo, países de África, Asia y Latinoamérica, generan un promedio de 0,1 a 0,3 kg por habitante por día (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012). En Argentina, la generación de datos respecto a los residuos resulta casi inexistente, por lo que se realizan abstracciones e inferencias diversas (De Luca, 2015). Se ha estimado una ppc que varía de 0,85 a 1,036

kg/hab.día, según la ciudad considerada (SAyDS, 2005). Para la provincia de Salta, se ha estimado una ppc igual a 0,857 kg/hab.día (De Luca, 2015).

La información de base cuali-cuantitativa de generación de RSU en las diferentes localidades, se obtiene a partir de muestreos en terreno y caracterización de los residuos, a fin de determinar la producción per cápita y las fracciones que pueden ser valorizadas, ya sea para reciclar, reusar, recuperar y/o generar energía, como así también dimensionar cada etapa de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (GiRSU). En un contexto actual de agotamiento de las fuentes fósiles de energía y con una oferta de recursos naturales definida por la capacidad planetaria de sustentarla, la introducción de gestiones integrales, que consideren desde la utilización de la materia prima hasta la reintroducción de los residuos generados en los ciclos productivos en nuevos ciclos de utilización, resultan esquemas de manejo y de pensamiento fundamentales. Es esencial cambiar el paradigma del concepto de residuo, por el de recurso y redirigir la actual gestión lineal a una gestión circular, en la cual se trabaje para disminuir los residuos antes de que se produzcan (UNPE, 2015).

En la provincia de Salta, en el año 2000, se sancionó la ley 7070 de Protección del Medio Ambiente, donde se determina la responsabilidad de los municipios de regular los residuos generados en el mismo (art.105). Más tarde, en el año 2010 se firmó el decreto 1365/10 con el fin de propiciar un eficiente tratamiento de RSU por medio del Plan Provincial de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (PPGIRSU), siguiendo la Estrategia Nacional de GIRSU. Dentro de la estrategia provincial de GIRSU, los municipios se agruparon en 14 regiones, aunque hoy solo existen 3 de manera formal. Una de ellas, la última en ser conformada, es el consorcio “Valles Calchaquíes 2”, constituido por los municipios de Cachi y Payogasta, según el Decreto 3282/15. La posibilidad de que este Consorcio avance en el desarrollo de propuestas exitosas para el manejo de los RSU en la región que abarca, depende de la existencia de una plataforma de datos e información que colecte los rasgos y características fundamentales de su población, sus recursos y su territorio. Como paso fundamental, la caracterización cuali - cuantitativa de los RSU no solo posibilitará diseñar estrategias de manejo y recolección a medida, sino también permitirá analizar diferentes opciones para la optimización de la actual gestión de los RSU en la zona. La generación de datos confiables y sistemáticos es necesaria para proponer mejoras y facilitar la toma de decisiones en políticas ambientales a partir de fundamentos sólidos. Por tanto, nuestro objetivo fue caracterizar los residuos que se generan en el departamento de Cachi, a fin de facilitar información de base (tipo, calidad, frecuencia y cantidad de residuos que se generan) que posibilite hacer las primeras estimaciones de las capacidades necesarias en los distintos equipamientos de la gestión de residuos, como así también proponer pautas para la toma de decisiones, dentro de un esquema de gestión integral de los RSU. Se estima asimismo el potencial energético de los residuos generados en la región, en vistas de incorporar dicho beneficio en un esquema de gestión integral y eficiente, que coadyuve simultáneamente a la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero y minimización de impactos ambientales negativos en la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El departamento de Cachi incluye dos municipios: Cachi y Payogasta (Latitud: 25° 5'20.10"S y Longitud: 66° 8'1.23"O). El clima es semiárido de altura y árido de sierras y bolsones, con precipitaciones estivales (163 mm anuales) y temperaturas que oscilan en verano entre los 20°C y 35°C y en invierno entre 5°C y 15°C. El suelo es de escaso desarrollo, con texturas desde arenosa hasta franco limosa (Zelarayán, 2015). Geomorfológicamente se caracteriza por ser un valle inter-montano elevado de orientación norte-sur por donde escurre el río Calchaquí. La vegetación de la región es representativa de las provincias fitogeografías de Monte y Prepuna (Cabrera, 1994). La superficie del departamento de Cachi es de 2.925 km². Cuenta con una población total de 7315 personas (INDEC, 2010).

Relevamiento de información de base

Se trabajó con información recopilada desde diferentes fuentes:

- i) primarias: mediante la aplicación simultánea de las técnicas de observación participante, registro fotográfico y encuestas.
- ii) secundarias: revisión y análisis de documentos, registros de datos en bruto, informes y otros.

Se realizaron dos viajes a cada una de las localidades bajo estudio: la primera en la estación de otoño, donde se visitaron los sitios de disposición final, organismos municipales, establecimientos educativos, hospitales y comercios de ambos municipios. La segunda instancia se llevó a cabo en primavera, particularmente para recabar información que no se pudo obtener anteriormente. En el caso de las encuestas, se realizaron a una muestra de población estadísticamente seleccionada del sector urbano, representando a las categorías de: a) generadores domiciliarios y b) grandes generadores, según se detalla en el siguiente apartado. El sector rural fue asimismo encuestado, considerando un censo de toda la población existente. La encuesta consistió en el relevamiento de los siguientes aspectos:

Aspectos	Tipo de información
Datos personales	Ocupación, nivel educativo, cantidad de personas en la casa, ingresos familiares
Sobre la vivienda	Tipo de servicios y tipo de combustibles utilizados Gastos en servicios y combustibles Tipo y cantidad de artefactos eléctricos
Sobre RSU	Percepción sobre RSU (es un problema? Hay microbasurales?, está conforme con la gestión? Interés en separación domiciliaria, interés en capacitación ambiental) Tipo de manejo de RSU (disposición de RSU: lugar y formato, días de recolección, información sobre la gestión, manejo de residuos peligrosos, separación y manejo, actividad de reciclado).

Tabla 1 Aspectos relevados mediante las encuestas aplicadas en el departamento de Cachi.

Caracterización de los RSU

Se aplicó la metodología desarrollada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS, 2005) que es la que mejor se adapta a los países en desarrollo. Permite obtener la ppc, como así también las distintas fracciones que se generan en cada zona. Se aplicaron dos variantes de la metodología: a) "método en origen" en la zona urbana y b) "cuarteo en disposición final" en la zona rural. El detalle de cada método se explica a continuación.

- Método 1: En el ejido urbano

Debido al tamaño poblacional (mayor que en zona rural), se estratificó según la escala de generación. Las categorías consideradas son dos: a) generadores domiciliarios y b) grandes generadores (comercios, restaurantes, hoteles, hostales, etc.). Para los generadores domiciliarios, dada la imposibilidad de relevar el total de las viviendas, se seleccionó una muestra de la población, mediante la ecuación (1):

$$n = \frac{Z_{1-\alpha/2}^2 N \sigma^2}{(N-1)E^2 + Z_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2} \quad (1)$$

Donde:

n = tamaño de la muestra (Nº de hogares en donde se realizará el muestreo), $Z_{1-\alpha/2}$ = coeficiente de confianza = 1.96 para un nivel de confianza del 95%. N = total de viviendas en el municipio=765 viviendas, σ = desviación standard (kg/hab.día), E = error permisible=5%.

Se utilizó un desvío estándar de 0,15 (kg/hab.día), debido a que la zona urbana no muestra variación en cuanto al nivel económico y por lo tanto, en la generación de RSU, según lo que se observó en el lugar y lo confirmado por el personal del municipio. Tanto el valor del coeficiente de confianza como los errores permisibles fueron utilizados según lo sugerido por la metodología.

Resultaron 32 unidades muestrales (viviendas), número que se duplicó a fin de reducir el desvío. Se utilizó una población proyectada al año 2017 de la zona urbana (2.872 habitantes), a partir de las estadísticas de INDEC 2001 y 2010 y estimando la tasa de crecimiento poblacional. La selección de las 64 viviendas involucradas en el muestreo se realizó sobre un plano en forma aleatoria sin estratificar. En cada vivienda se entregaron dos bolsas de distintos colores (celeste y rojo), ambas con identificación correspondiente. La primera fue para los residuos secos, como: el cartón, el papel, las botellas plásticas, etc. Mientras que la segunda para residuos húmedos, donde se incluyen sanitarios y orgánicos entre otros. Se dieron todas las instrucciones y capacitaciones necesarias a las familias, lo que facilitó la correcta participación de la gente. La recolección de las bolsas repartidas, se realizó siguiendo el recorrido y con la misma frecuencia del servicio de recolección en el municipio (lunes, miércoles y viernes). La recolección se realizó con un vehículo municipal. Asimismo, en cada hogar se aplicó la encuesta previamente mencionada.

- Método 2: En el sector rural

Se aplicó el método de “cuarteo en disposición final” y se ejecutó sobre el total de la población de los parajes, ya que el tamaño poblacional así lo permitía., el resultado es una muestra del total de RSU generado por los mismos. Aplicar el “método en origen” en la zona rural, resultaba poco conveniente, debido a que tanto las viviendas como los parajes se encuentran muy alejados unos de otros, lo que implica un costo adicional en combustible, tanto para la distribución de las bolsas como para su recolección. Aplicando esta otra variante, se pudieron distribuir de manera eficiente los limitados recursos destinados por el municipio hacia el presente estudio.

Se calculó una muestra exclusivamente para la aplicación de las encuestas, tomando los mismos valores que para la zona urbana, pero a diferencia de aquella, aquí se utilizó el número total de habitantes como el tamaño de la población (N), 1644 para el año 2017. Los RSU generados por los habitantes se recolectaron en bolsas como muestras simples, que luego se combinaron para formar una única muestra compuesta. Una vez recogidas las bolsas, se rompieron sobre un plástico grande, y se mezclaron los residuos utilizando una pala. Después de dicha mezcla, se procedió a realizar un muestreo por cuarteo, seleccionando dos cuartos opuestos del montículo. La muestra menor se volvió a mezclar y se dividió en 4 partes nuevamente, hasta obtener una muestra de 50 kg de residuos o menos.

Procesamiento de muestras

- Caracterización física

Se estimó la densidad o peso específico (kg/m^3) de los RSU, utilizando un recipiente de volumen conocido, relleno con residuos. Se pesó el recipiente, luego se descontó el mismo del peso de los residuos. Se obtuvo, de esta manera, los datos para cálculo de la densidad (2).

$$\text{Densidad (D)} = \frac{(\text{Peso del residuo (kg)})}{(\text{volumen del residuo (m}^3\text{)})} \quad (2)$$

- Cuantificación de los RSU

$$\text{Producción per cápita (PPC)} = \frac{(\text{Peso total de residuos (kg)})}{(\text{total de personas o generadore s})} \quad (3)$$

$$\text{Producción media diaria} = \text{PPC} * \text{número de habitantes de la zona} \quad (4)$$

Se eliminaron los valores por debajo del percentil 5% y por encima del 95% a fin de evitar el sobredimensionamiento, ya que los valores presentaron cierta variación (Research and Education Association, 1978). Para el municipio de Payogasta, se recurrió a información existente sobre la caracterización de RSU (Cabral, 2016), generada a partir de la metodología de cuarteo tanto en Finca Palermo como en Payogasta. Además, se complementó dicha información mediante la realización de idénticas encuestas a las ya realizadas en el municipio de Cachi.

- Caracterización macroscópica

La muestra de residuos de ambos municipios, tanto de parajes como de la zona urbana, se pesaron y separaron en el mismo sitio de disposición final. Luego se clasificaron según:

Fracciones	Subfracciones
Aprovechables	PET (botellas de bebidas), bolsas plásticas, plásticos blandos, plásticos duros, papel-cartón, tetrabrik, vidrio, etc.
Peligrosos	pañales, apósitos, aerosoles, pilas, aceites, desechos de animales.
Orgánicas	Restos de comida, podas de jardín, hojas
Otros	Neumáticos, gomas, maderas y escombros, etc.

Tabla 2 Fracciones de RSU de la caracterización macroscópica

Estimación del potencial energético disponible

Para poder estimar el potencial energético, se asumió que una correcta gestión para la zona podría incluir la disposición final de los RSU en un relleno sanitario (RS), a partir de la transformación de la fracción orgánica de RSU, mediante procesos de digestión anaeróbica. Esta alternativa constituye una opción común para recuperar una fracción de la energía contenida en la masa residual. La digestión consiste en una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases llamada biogás (principalmente CH₄ y CO₂) o gas de vertedero (landfill gas, LFG) y a una suspensión acuosa o “lodo” que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales presentes inicialmente en la biomasa. El biogás podría ser utilizado para generar energía térmica, eléctrica o ambas. De esta manera se podría recuperar el gas de vertedero disminuyendo las emisiones de CH₄ hacia la atmósfera. Las estimaciones se realizaron haciendo una proyección a 20 años, plazo medio estimado para la vida útil de un relleno sanitario.

Se consideró que del total de RSU estimado para el departamento, solo el 80% es material que llegará al relleno, el resto forma parte de la fracción aprovechable. Se utilizó la metodología del IPCC (2006), para estimar las emisiones de CH₄ provenientes de la descomposición de los residuos en sitios de disposición final. Este método se basa en una ecuación cinética de primer orden (FOD). La metodología define 3 niveles de aplicación, según el detalle de los datos con los que se cuenta. Para el nivel 1, las Directrices del IPCC, proporcionan un modelo Excel, el cual facilita, según el país y región, datos de la actividad y parámetros por defecto. Al no poseer datos de mediciones ni estadísticas de las emisiones de CH₄ a nivel nacional, provincial ni mucho menos locales, se utilizaron datos y parámetros por defecto propuesto por la metodología según las características climáticas de la región (nivel 1), ya que las tasas de descomposición son diferentes. La zona climática que más se ajustaba a la región de los Valles Calchaquíes, fue la del clima seco. La cantidad de metano emitido, en un año específico se estima asumiendo que, del total de metano generado, una parte se oxida en la cubierta de los rellenos sanitarios o se recupera para la generación de energía o su quema en antorcha (5):

$$\text{CH}_4 \text{ emitido en el año } T(\text{Gg/año}) = (\sum \text{CH}_4 \text{ generado } ((x, T) - R)) * (1 - \text{OX}(T)) \quad (5)$$

Donde: T es el año del inventario; x es la categoría o tipo de desecho y/o material; R es el metano recuperado durante el año T; OX factor de oxidación durante el año T. Luego, para estimar la cantidad de CH₄ que se forma a partir del material que puede descomponerse, se multiplica la fracción de CH₄ contenida en el gas de vertedero generado por el cociente de pesos moleculares CH₄/C (16/12) (Ec 6).

$$\text{CH}_4 \text{ generado } (T) = \text{DDOCm descomp } (T) * F * 16/12 \quad (6)$$

Donde DDOCm descomp, es la cantidad de carbono orgánico degradable que se descompone ese año y F, es la fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado, y donde DDOCmd es la masa del carbono orgánico degradable disuelto –DDOC- dada en Gg; W es la masa de los

desechos depositados; DOC es el carbono orgánico degradable durante el año de deposición; DOCf fracción del DDOC que se puede descomponer; MCF es el factor de corrección de CH₄ para la descomposición aeróbica durante el año de descomposición (7)

$$DDOC_{md} = w(t) \times DOC \times DOCf \times MCF \quad (7)$$

Se realizaron dos tipos de estimaciones energéticas:

- i) el máximo potencial de energía térmica que podría obtenerse a partir del biogás generado,
- ii) y el máximo potencial de energía eléctrica que podría obtenerse si se empleara la energía del biogás para este fin.

En el primer caso, fue necesario obtener la cantidad de biogás recuperado (η) desde el RS, se consideró una eficiencia de captura del 70%, valor utilizado en el trabajo de Quilez et al. (2013). Por lo que la energía potencial del metano se estimaría como:

$$\text{Energía potencial del CH}_4 \text{ (Gcal/t)} = \Sigma(\text{CH}_4/\text{año}) \times \text{PCI}_{\text{CH}_4} \times \% \text{valorización} \quad (8)$$

Donde: PCI: Poder calorífico inferior 11,94 Gcal/t; % de valorización= 70%. Proporción del total de CH₄ generado realmente aprovechable.

En el segundo caso, se estimó la generación de electricidad a partir del CH₄ (gas de interés energético) utilizando las siguientes fórmulas y asumiendo se utilizaría moto-generadores preparados para biogás con potencias que varían de acuerdo a la disponibilidad de biogás existente (BID, 2017). Una vez que se obtuvo la energía potencial del CH₄, se convirtió este valor a generación de electricidad:

$$\text{Potencia disponible (kW)} = \eta t \times \text{PCI}_{\text{CH}_4} \times Q_{\text{CH}_4} \quad (9)$$

Donde: ηt : rendimiento térmico de la generación eléctrica. Se asumió un valor medio igual a 30%. PCI_{CH_4} : 9,11KWh/m³ (Eurostat, 2014). Q_{CH_4} : caudal de biogás capturado (m³CH₄/hora). Para el cálculo del caudal se utilizó la densidad del metano (0,656 kg/m³). Una vez resuelta la ecuación anterior, se utilizó dicho valor para conocer la energía eléctrica producida.

$$\text{Electricidad (kWh/año)} = (\text{potencia disponible}) \times 0,85 \times 8760 \quad (10)$$

Se asumió un factor de disponibilidad de la potencia del 85% por mantenimiento y se multiplicó por 8760, para convertir la energía producida en horas totales de funcionamiento por año.

Estimación de la demanda energética

Las demandas térmica y eléctrica, se estimaron a partir del consumo de gas envasado y de electricidad, respectivamente de la zona residencial en todo el departamento. A fin de observar no solo la demanda actual (año 2017) sino también la proyección en el tiempo futuro, se consideró el crecimiento de la demanda tomando como punto de partida las estadísticas del año 2010 (DGE, 2010) y como punto intermedio, el año de realización de este estudio (2017), donde se incorporaron datos recabados en las encuestas domiciliarias. A partir de la tendencia observada entre estos años, se hicieron las proyecciones futuras.

Para el caso de la **demandas térmica**, se partió de la cantidad de garrafas consumidas por mes y por viviendas que expresó la población encuestada. Con ese dato y considerando una garrafa promedio de 12 kg, se obtuvieron los kg totales de gas consumidos para cada municipio. Luego dividiendo por el total de la población del departamento, se consiguió el consumo per cápita (cpc) por mes. Con este valor multiplicado por 12, se obtuvo la demanda anual, la cual multiplicada por el PCI el gas licuado (garrafa)¹ se convirtió en demanda térmica. Para los cálculos se consideró que solo el 52% del total de la población consume gas en garrafa en el sector residencial (según DGE, 2010). Los datos usados fueron: número total de viviendas en

¹ Gas licuado (garrafa)= 10.950 kcal/kg (página web del Ministerio de Energía y Minería)

todo el departamento, 2224 y 2447 (años 2010 y 2017); número de viviendas que consumen garrafas, 1166 y 1272, para los años 2010 y 2017, respectivamente.

Para el **consumo eléctrico**, se utilizó el valor de (0,036 MWh/hab/día) (DGE, 2010). Luego, para obtener el consumo medio anual en cada municipio, se multiplicó el cpc por la población total y por 12 para estimar el valor anual (kWh/año). Del mismo modo que en la demanda térmica, se tuvo en cuenta que el 82% de la población total está conectado a la red de energía eléctrica. En el caso de Cachi, en la zona urbana el tamaño de la muestra fue de 277 personas, mientras que para la zona rural fue de 100 personas. Por otro lado, en Payogasta se utilizó una muestra de 83 personas. Para ambos casos fue necesario proyectar la población a futuro. Esto se realizó utilizando la tasa de crecimiento intercensal igual a 5% en el periodo 2001-2010 (DGE, 2010). Por último, se calculó el potencial de cobertura energética, para lo cual, se dividió la generación térmica desde biogás por la demanda térmica, obteniendo la proporción de cobertura. Idéntico proceso se realizó para estimar la cobertura eléctrica

Estimación de la potencial reducción de gases efecto invernadero (GEIs)

La utilización del metano generado a partir de los RSU, implicará la mitigación de dos gases de efecto invernadero: el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂):

- El primero sucede al capturar el CH₄ contenido en el biogás generado del relleno sanitario (emisiones directas), sería el caso si la energía de los RSU se usara solo con fines térmicos.
- y el segundo por el desplazamiento de combustibles fósiles en la energía eléctrica producida (emisiones indirectas), sería el caso si la energía de los RSU se utilizara con fines eléctricos, en cuyo caso los beneficios de mitigación incluirían tanto las emisiones directas como las indirectas.

Para estimar las reducciones de GEI “directas”, se multiplicó el valor del CH₄ generado por su potencial de calentamiento global (PCG), igual a 28, para convertir las emisiones de CH₄ en toneladas de CO₂ (tCO_{2eq}). Así mismo para estimar las “indirectas”, se consideró el factor de emisión de la red eléctrica 0,5 tCO_{2eq}/MWh y el porcentaje de cobertura de la demanda, en este caso es del 4% (MINEM, 2015).

RESULTADOS

Cuantificación y caracterización de RSU

En el municipio de Cachi, la muestra poblacional analizada en el sector urbano generó un total de 427,4 kg de RSU en una semana, implicando un promedio de 61,4 ± 25,3 kg de RSU por día. **0,33**

	Zona y tipo de generador de RSU		
	Urbana		Rural
	GD	GG	GR
PPC(kg/hab .día)	0,21 ± 0,92	3,14 ± 6,08	0,15 ± 0,36
PMD (t/día)	0,54 ± 0,14	0,062 ± 0,18	0,4 ± 0,15
DA (kg/m3)	104 ± 4,24	109,6 ± 2,12	s/d
Fracciones de RSU (%)			

Tabla 3 Generación de RSU (cantidad y tipo) en zona rural y urbana, distinguiendo entre generadores domiciliarios (GD), grandes generadores (GG) y generadores rurales (GR),

expresados como ppc acompañados de su desvío estandar y generación media, en el municipio de Cachi. Donde: PMD= producción media diaria, DA= densidad aparente, s/d= sin datos.

En el municipio de Payogasta, el peso total de los RSU fue de 73,8 kg en 24 horas, correspondiéndole una densidad igual 72,1 kg/m³. La cantidad total de habitantes presentes el día del muestreo resultaron ser 132 personas.

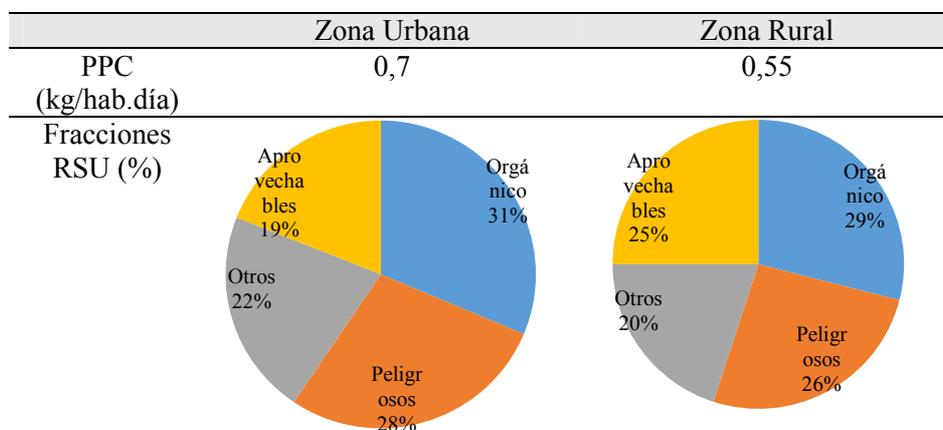


Tabla 4 Generación de RSU (cantidad y tipo) en zona rural y urbana en el municipio de Payogasta

Estimación del potencial energético disponible en el Consorcio

En cuanto a la demanda térmica, el consumo per cápita de gas es igual a 3,60 kg/hab.mes y 0,12 kg/hab.día. Mientras que el consumo de electricidad resulta 0,436 MWh por año por persona.

La potencial oferta térmica que podría obtenerse si los RSU se depositaran en un relleno sanitario, es igual a 5 veces la demanda para los primeros años y hasta 6 veces luego de 20 años; es decir, existe una potencial oferta energética disponible desde el biogás, que excede la demanda actual y futura (para las tasas de crecimiento asumidas). La potencial oferta eléctrica lograría cubrir solo el 4% de la demanda total en todo el departamento de Cachi, manteniéndose constante durante los 20 años proyectados.

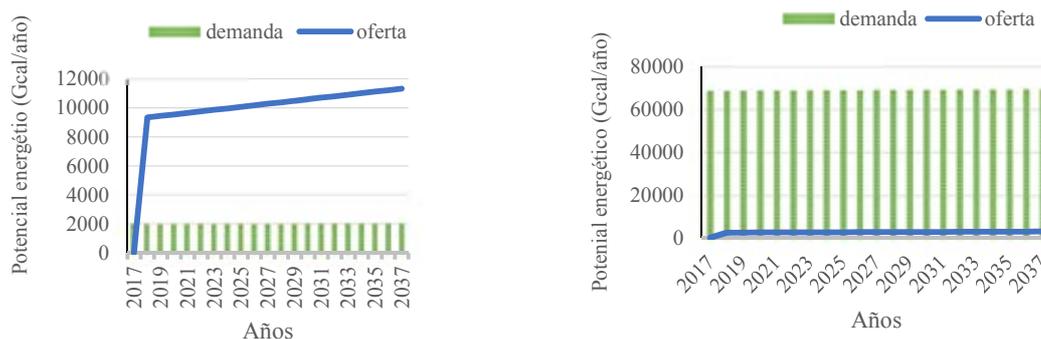


Tabla 5 Potencial sustitución de la demanda térmica (izquierda) y potencial cobertura de la demanda eléctrica (derecha) en el departamento de Cachi.

Estimación de la reducción de emisiones de GEI

En el primer año no se evitan emisiones de GEIs, debido a que los procesos microbianos de descomposición del residuo recién depositado, comienzan a desarrollarse poco a poco. Luego, a partir del año 2018 y hasta el año 2037, las reducciones de emisiones de CO_{2eq} para las emisiones directas representan el 97% del total de emisiones por año, y para las emisiones indirectas solo el 7% del total por año.

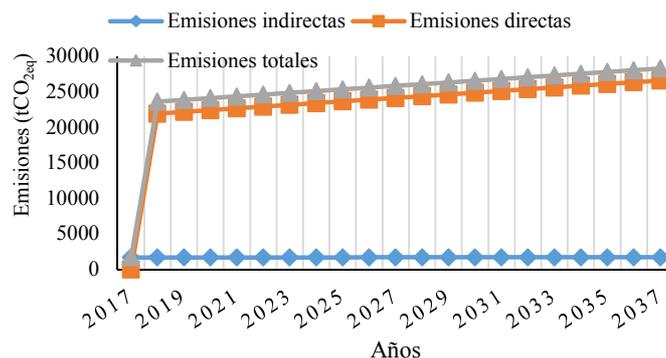


Tabla 6 Reducción de emisiones de GEIs considerando tanto emisiones directas (captura de CH₄) como emisiones indirectas (desplazamiento de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica).

DISCUSION

Con respecto a la generación y caracterización de RSU

La tasa de generación de residuos per cápita fue mayor en el municipio de Payogasta que en el municipio de Cachi, considerando ambas zonas (rural y urbana). Esto puede deberse a diferencias en la metodología de cuantificación aplicadas, ya que en el primer municipio la cuantificación no se realizó según escalas de generación, incluyendo dentro de la muestra a los grandes generadores. Del mismo modo, si se comparan los valores de generación obtenidos con los que establece la Ingeniería y Asistencia Técnica en Argentina S.A (IATASA) para poblaciones de entre 2500 y 5000 habitantes (0,603 kg/hab.día), se puede observar claramente que el municipio que más se ajusta a este valor es el de Payogasta. Es por ello la importancia de trabajar con datos generados localmente, ya que, de otro modo, al utilizar el valor estimado por dicha entidad, se estaría sobredimensionando la capacidad del sistema de gestión y con ello se incurriría en costos innecesarios tanto de inversión como operativos. Situación que podría llevar al municipio a decidir no regularizar su actual gestión.

En cuanto a la caracterización macroscópica, en la zona urbana, de ambos municipios, se genera mayor proporción de residuos orgánicos que en la zona rural. Posiblemente, esto se deba a que, en el sector rural, los residuos orgánicos se reaprovechan en mayor proporción, siendo utilizados como alimento de animales domésticos, destinados a elaboración de compost o directamente son quemados o enterrados. Por otro lado, en la zona rural se genera mayor proporción de la fracción aprovechable (destacándose el plástico), debido a que la población no goza de un servicio de agua potable, lo que resulta en un mayor consumo de bebidas envasadas.

Con respecto a la propuesta de gestión de los RSU

En promedio, se genera 43% de fracción orgánica en el departamento de Cachi. Dicho valor evidencia la gran oportunidad de implementar un relleno sanitario anaeróbico con posible aprovechamiento energético como sistema de disposición final, ya que además, la estimación de producción de biogás y la cobertura de la demanda térmica del departamento, son óptimas para implementar este tipo de disposición final. Si bien las estimaciones de demanda térmica solo se realizaron a partir del sector de la población que utiliza gas de garrafa para cocción (residencial), por lo cual, la demanda térmica del departamento es superior a la estimada, aun así, el potencial bioenergético disponible muestra un amplio margen de beneficios. La posibilidad de sustituir este combustible fósil (gas de garrafa) por uno renovable (biogás), y con notables impactos ambientales positivos en la región, brindaría un valor agregado importante al sistema de relleno sanitario propuesto. Por otra parte, si la bioenergía disponible fuera utilizada para generación de electricidad, dada la baja eficiencia de conversión del propio sistema y bajo margen energético propio del biogás (cuyo 50% aproximadamente es CO₂ no energético), sumado a la necesidad de limpieza del gas y su adecuación al sistema generador, tornan poco viable este tipo de aprovechamiento. Sin embargo, en un contexto actual de mercados de

carbono y acuerdos ambientales internacionales, quizás ésta pueda resultar una alternativa factible en el futuro.

Con respecto al impacto en el medio natural y social

El aporte de GEI hacia la atmósfera desde el sector residuos a nivel nacional fue de 14 MtCO_{2eq} en el año 2014. Esto es igual a 14.000 Gg de CO_{2eq}, de los cuales el 69,2% pertenecen netamente a la eliminación y quema de RSU (MAyDS, 2017). En la provincia de Salta este aporte se reduce a 0,21 Mt de CO_{2eq} que corresponden a 2100 Gg de CO_{2eq} (MAyDS, 2014). Suponiendo que los aportes se mantuvieron desde el año 2014 a la actualidad sin grandes variaciones, el departamento de Cachi aportaría para el año 2018, 31 Gg de CO_{2eq}, que corresponden al 1,4% del aporte provincial y al 0,22% del aporte nacional. Con la implementación de un RS, las emisiones aportadas se reducirían para el 2018 a 8 Gg de CO_{2eq}, que significarían solo el 0,38% del aporte provincial y 0,05% del aporte nacional. Estos notorios beneficios se obtendrían a partir de una localidad cuya superficie solo significa el 1,8% del territorio provincial y cuya población representa solo el 0,55% de la población provincial. En esta perspectiva, las ventajas ambientales de que otros municipios se sumen a sistemas de gestión integral de sus residuos como en Cachi, pueden visualizarse fácilmente.

Es importante considerar el marco de oportunidad que significan la CMNUCC, el Protocolo de Kyoto y el más reciente Acuerdo de París, en el cual Argentina se ha comprometido. El respaldo financiero, la transferencia de tecnología y las políticas de fomento, constituyen un conjunto válido que podría contribuir para hacer frente de manera exitosa al alto costo de inversión inicial en un sector que atrae poco interés como es de los RSU. En la alternativa de que un proyecto como el planteado ingrese en los mercados de carbono como Créditos de Emisiones Reducidas (CER), y para un precio actual de 9 € = 1 tCO_{2eq}, y para la generación de CH₄ esperada (5 Gg= 5000 toneladas/año), se podría obtener un ingreso económico de 45.000 Euros anuales. Más allá de las discusiones de base sobre el mercado de bonos de carbono y la conveniencia de entrar en un sistema de esta naturaleza, éste u otro mecanismo que cubran los costos de inversión inicial, sería un respaldo suficiente para poner en marcha sistemas ambiental y sanitariamente ventajosos en la provincia.

CONCLUSIONES

Este estudio resulta un primer paso importante en la construcción de una base de datos que sirve no solo para poder conocer la naturaleza y cantidad de residuos que se generan en el departamento de Cachi, sino que también permite diseñar y dimensionar un sistema de gestión adecuado. Brinda también una plataforma necesaria para realizar monitoreos evaluando la dinámica a lo largo del tiempo, como así proyecciones adecuadas hacia el futuro. La información proporcionada debería ser complementada con muestreos en diferentes épocas del año, que permita incorporar las variaciones de flujos estacionales de población flotante, logrando medias anuales más precisas.

Respecto a las características de la generación, una mayor proporción de residuos de naturaleza orgánica (43% en promedio), es notablemente mayor frente al resto. Esto implica que la alternativa de emplazar un RS anaeróbico con aprovechamiento de biogás resulta potencialmente viable en el aspecto energético y ambiental. Las estimaciones realizadas en este trabajo, muestran una potencial cobertura de demanda térmica actual de entre 5 y 6 veces a partir del biogás que podría obtenerse desde el RS, y una cobertura del 4% del total de demanda eléctrica existente en la actualidad. Si esa bioenergía disponible se utilizara con fines térmicos, tendría un beneficio económico añadido, ya que la población dejaría de gastar en la compra de garrafas. Con respecto al aprovechamiento del metano para la generación de energía eléctrica, si bien la cantidad de personas alcanzadas por este beneficio es baja, esta generación se podría utilizar para abaratar costos dentro del emplazamiento del relleno sanitario o para el alumbrado público.

La correcta disposición y tratamiento de los RSU en un relleno sanitario para el Consorcio, no solo estaría estabilizando los RSU, sino también contribuiría en la mitigación del metano emanado hacia la atmósfera en un 97% (emisiones directas) y en el desplazamiento del uso de

hidrocarburos o combustibles fósiles hacia el uso de energías limpias. Resulta evidente que la planificación de un sistema de gestión integral adecuado para la zona, debe partir de la realidad concreta del sitio, a fin de disminuir el riesgo de cometer errores, como, por ejemplo, en el dimensionamiento de las etapas de gestión.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los pobladores del departamento de Cachi (Intendentes, Secretarios, otros actores sociales) por la predisposición para responder las entrevistas y participar comprometidamente para la consecución de este trabajo. A la Municipalidad de Cachi, por acompañar y facilitar la logística en la zona. A la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable y en especial, a la Ing Mónica Pasculli, por el apoyo brindado para el éxito de este proyecto. A los estudiantes que colaboraron con el muestreo y en la aplicación de las encuestas, se agradece su esfuerzo y entusiasmo.

REFERENCIAS

- Cabral, R. 2016. Propuesta de una nueva Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos para el Municipio de Payogasta
- Cabrera, A. 1994. Regiones Fitogeográficas Argentinas. En: Kugler, W. (ed.), Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, 2º ed., T II, F 1, 85 pp
- CEPIS, 2005. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales
- De Luca, M. 2015. Estudio de Estrategia y Factibilidad de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) para la República Argentina. Área de pensamiento Estratégico.
- DGEC. <http://estadisticas.salta.gov.ar/>
- Dirección General Europea (Eurostat), http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics.
- Hoorweg, D y Bhada-Tata, P 2012. What a waste: Global review of solid waste management. World Bank, Washington DC, p. 81-83. www.worldbank.org/urban.
- INDEC. 2010. <http://www.indec.gob.ar/>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2006 - Synthesis Report. Disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm. Acceso en: 1º fev. 2011
- MAyDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable), 2016. Informe del estado del ambiente de la República Argentina. Editorial Bs As.
- MINEM, 2015. Ministerio de Energía y Minería.
- Quilez, F. 2013. Proyecto de Construcción de la Celda nº 1 de Vertido del Vertedero de Residuos no Peligrosos del Complejo Ambiental de Zonzamas.
- Research and Education Association. 1978. Modern Pollution Control Technology, Vol. II. Research & Education Association, Nueva York, EUA, pp. 82-89
- SAyDS, 2005. Estrategia Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- UNEP and ISWA, 2015. Global Waste Management Outlook. Disponible en: https://www.unep.org/ietc/sites/unep.org.ietc/files/GWMO_summary_0.pdf
- Zapata, O. 2011. Residuos y salud: Tartagal – Salta pp.35-43. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185175872011000200005&lng=es&nrm=iso.
- Zelarayán, A. y Fernández D. 2015. Línea de base ambiental y diagnóstico territorial. OT Alta Cuenca del Río Calchaquí. Salta - Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

ABSTRACT: The regularization of the management is based on a worldwide level, since the poorly managed waste causes serious effects on health and the environment. The generation of reliable and systematic data is necessary to propose improvements and facilitate decision-making in environmental policies. For all the above, it was decided to study the current management of urban solid waste in the department of Cachi, including the two municipalities: Cachi and Payogasta. The waste generated there was characterized, applying the methodology proposed by CEPIS for developing countries. The results obtained show that, the department has a clear tendency to generate the organic fraction in relation to the total of RSU (43% on average). The per capita production for the municipality of Cachi was: urban area 0.21; large generators 3.14; rural area 0.15. In Payogasta: urban area 0,7 and rural area 0,55 kg / inhab / day

Keywords: Cachi and Payogasta, biogas, characterization, solid waste, thermal energy.

LA CENTRALITA FVCEL COMO RECURSO PARA LA DIFUSION DE LA ENERGIA FOTOVOLTAICA EN LA CIUDAD DE ORAN

Dora Mendoza¹, Pablo A. Mendoza², Verónica M. Javi³, Cecilia I. Castro⁴, Juan M. Mendoza⁵
Instituto Nacional de Investigación en Energías no Convencionales – U.N.Sa - CONICET – Consejo de Investigaciones de la U.N.Sa
Sede Regional Orán – U.N.Sa — Alvarado 751 CP 4530 – Orán-Salta-Argentina - Tel: (03878) – 421388 – email: dmendoza412@yahoo.com.ar

Recibido 10/08/18, aceptado 20/09/18

RESUMEN: El suministro eléctrico de la ciudad Orán proviene totalmente de la Red. El uso de las energías renovables en la zona urbana es casi nulo, solo se utilizan microsistemas fotovoltaicos en la zona rural. Con el propósito de iniciar acciones de difusión sobre el uso de fuentes alternativas, como el sol, docentes universitarios realizan el montaje de la Centralita FVCel en el predio de la sede. Se trata de una Estación FV Off Grid destinada a la carga de celulares, de fácil acceso y disponible para toda la comunidad universitaria. Durante 2017, fue usada como recurso indispensable para la difusión de la energía fotovoltaica en instituciones educativas del nivel Primario, Secundario y Terciario y la comunidad de Orán. A través de jornadas, charlas, visitas guiadas, muestras interactivas y ferias se procuró dar a conocer fuentes alternativas y generar conciencia sobre su disponibilidad y conveniencia de uso.

Palabras clave: Energía solar, Estación FV Off Grid, Difusión, Educación.

LA TECNOLOGIA FV, UNA PROPUESTA EN CRECIMIENTO

Las tecnologías fotovoltaicas, que permiten aprovechar la radiación solar produciendo energía eléctrica, han evolucionado desde las primeras celdas solares hasta una gran variedad de tecnologías que comienzan a ser viables económicamente aún en nuestro país. Los sistemas fotovoltaicos pueden instalarse bajo la modalidad centralizada o de acuerdo la llamada generación distribuida, cada una con características específicas, ventajas y desventajas (Rampinelli G. A. et al., 2013).

La generación distribuida hace mención a la producción de energía cercana al uso final, y actualmente en Argentina se generaliza la adopción de sistemas conectados a la red de distribución de energía eléctrica (Godfrin E.M. et al, 2016). Un aspecto que debe considerarse es que las políticas públicas de fomento de la generación eléctrica con fotovoltaicos difieren si se trata de sistemas autónomos o conectados a red (Morante Trigoso F. et al, 2008). En la provincia de Salta, por ejemplo, el conexionado a red está contemplado por la Ley N° 7824 para generadores industriales, residenciales y/o productivos. El límite de potencia es de 30kW para un usuario residencial y de 100 kW para un usuario industrial o productivo bajo la figura de “balance neto”, es decir la generación de energía eléctrica en paralelo con la red de la distribuidora, a la cual podrá inyectarla. Esta Ley se encuentra vigente desde 2014 y claramente no contempla el autoconsumo (Sec. General de la Gobernación de Salta, 2014).

¹ Docente Investigador C.I.U.N.Sa

² Docente Investigador C.I.U.N.Sa

³ Docente investigador INENCO - CONICET-U.N.Sa - C.I.U.N.Sa

⁴ Docente Investigador C.I.U.N.Sa

⁵ Colaborador C.I.U.N.Sa

Muchas son también las aplicaciones en zonas aisladas o alejadas de la red asociadas a la ruralidad. En Argentina, por ejemplo el Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) es el instrumento de política pública que lleva adelante la electrificación rural en comunidades y parajes rurales aislados (Schmukler M. et al, 2015) utilizando sistemas fotovoltaicos. Pueden mencionarse también aplicaciones para el bombeo de agua, para energización de cercos, iluminación, y un conjunto importante de experiencias de transferencia de tecnología fotovoltaica en zonas rurales (Serpa P., 2006; Fedrizzi M. C. et al, 2006; Righini R. et al, 2008).

Por otra parte, los cambios recientes en las políticas energética y económica del país han promovido un fuerte fomento a la inversión en Energías Renovables, principalmente de la mano del programa RenovAR que fue concebido en 2016 por el Ministerio de Energía y Minería para cumplir con las metas establecidas en la nueva Ley 27191. Se concretaron licitaciones con 123 ofertas por unos 6400 MW, con precios de adjudicación que resultaron los más bajos de la historia reciente argentina. Se destacan los de generación eólica (70% del total), solar (23% del total) y biogás (7%). Por su parte, el RenovAr. 1.5, captó los proyectos eólicos y solares fotovoltaicos remanentes y se adjudicaron unos 1281 MW (10 a proyectos eólicos por 765.4 MW y 20 a solares por 516.2 MW). (KPMG Informe Especial, 2017). En la Tabla 1 se muestran los proyectos adjudicados para las provincias del NOA (Noroeste argentino), entre ellos la provincia de Salta a la que pertenece la localidad de Orán (Boletín Oficial de la República Argentina, 2017).

PROYECTOS ADJUDICADOS RONDA 1,5 - NOA – RES. N° 280/16		
Solar – Provincia de Catamarca	49 MW	Oferentes varios
Solar – Provincia de La Rioja	35MW	Oferente ARAUCO
Solar – Provincia de Salta	80MW	Oferente ISOLUX – Cafayate
Eólica – Provincia de La Rioja	95MW	Oferente ARAUCO – Arauco I y II
PROYECTOS ADJUDICADOS RONDA 1 – NOA – RES. N° 136 E/16		
Eólico – Provincia de La Rioja	99,75MW	Oferente ARAUCO
Solar – Provincia de Jujuy	300MW	Oferente JEMSE –Cauchari
Solar – Provincia de Salta	100MW	Oferente FIELDFARE (S. A. Cobres)

Tabla 1: Resultados de las rondas 1 y 1,5 de plan RenovAr 2016 para el NOA. Resoluciones N° 136 E/2016 y N° 281 E/2016 del Ministerio de Energía y Minería de la Nación.

El advenimiento de nuevos materiales, nuevos microprocesadores e innovadoras estrategias ingenieriles hacen que hoy puedan diseñarse e implementarse sistemas de generación desde unos pocos watts hasta planta de miles de megawatts de potencia (Huacuz Villamar J., 1999). Es de esperar que la incorporación al mercado eléctrico argentino de plantas de potencia con tecnología solar fotovoltaica amplíen el mercado de insumos eléctrico / electrónicos avanzando sobre las barreras que las Energías Renovables tienen en Argentina. Sin embargo, el acceso de la población en general a estos equipos depende también de su capacidad de hacer frente al costo inicial de los mismos, variable, al menos controversial.

Esta introducción argumenta a favor de la consideración y el fomento del uso de microsistemas fotovoltaicos, allí donde la energía se encuentre disponible, aún en zonas urbanas con acceso a la red.

LA CIUDAD DE ORAN: CARACTERIZACION REGIONAL

San Ramón de la Nueva Orán es la ciudad cabecera del Departamento de Orán. Se ubica en el sector central del extremo norte de la provincia de Salta. Al norte limita con la República de Bolivia y los departamentos de Santa Victoria, Iruya y San Martín; al este con el departamento de Rivadavia, al sur con el de Anta y al oeste con la provincia de Jujuy. Sus coordenadas son 23° 08' 10" latitud S y 64° 19' 20" longitud O, con una altura sobre el nivel del mar de 336 m. Se encuentra a 260 km de la Capital de la Provincia. Se encuentra emplazada en el Valle de Zenta, rodeada de cerros pertenecientes a la Cordillera Oriental o precordillera de los Andes. (Figura 1).



Figura 1: a) Ubicación geográfica del departamento de Orán en la Provincia de Salta, b) vista aérea de la ciudad, c) plazas cubiertas con lapachos, especie característica de la zona.

El clima de Orán es subtropical serrano: presenta veranos desconfortables durante las 24 horas del día debido a las temperaturas, humedades y precipitaciones elevadas, mientras que los inviernos suelen tener temperaturas agradables durante el día y noches frías. En la tabla 2 se presentan estadísticas climatológicas normales para la Ciudad de Orán, periodo 1981-2010, correspondientes a los meses de verano e invierno (Servicio Meteorológico Nacional, 2018).

Valor Medio de	Ene	Feb	Jun	Jul	Dic
Temperatura (°C)	S/D	25.1	15.0	14.7	26.0
Temperatura máxima (°C)	32.3	31.1	21.2	22.0	32.6
Temperatura mínima (°C)	21.5	20.8	11.0	9.2	21.2
Humedad relativa (%)	S/D	S/D	82.3	75.4	74.7
Velocidad del Viento (km/h)	8.4	8.4	6.8	7.7	8.6
Nubosidad total(octavos)	S/D	S/D	5.1	4.0	5.3
Precipitación (mm)	216.6	183.7	6.3	4.5	170.1
Frec. de días con Precip. Sup. a 0.1 mm	14.3	12.9	3.9	2.8	12.9

Tabla 2: Estadísticas climatológicas de algunos meses (periodo 1981-2010), Ciudad de Orán.

En la actualidad, en esta región se puede apreciar la conformación de tres microclimas (Ruiz, C. Y., 2009). Los factores pueden ser diversos, entre ellos, el desmonte de los bosques que rodeaban a la zona urbana. En la Tabla 3 se disponen de registros de temperaturas para los meses de invierno y verano correspondiente al periodo 2016 a 2018, en donde se pueden observar temperaturas altas para los meses de enero (Servicio Meteorológico Nacional, 2018). La Organización Meteorológica Mundial ha manifestado que en todo el planeta se batieron récords de temperaturas cada vez más elevadas. Así que lo que ocurre en el país y sobre todo en la ciudad de Orán no son casos aislados. El año 2017 ha sido un año muy caluroso.

	2016		2017				2018		
	enero	dic	enero	junio	julio	dic	enero	junio	julio
Máx media (°C)	32.0	33.1	35.1	22.8	23.4	33.1	32.3	20.3	19.5
Media (°C)	24.8	26.9	28.7	17.2	17.7	27.4	26.8	14.3	14.5
Mín media (°C)	17.5	20.7	22.2	11.5	11.9	21.7	21.3	8.3	8.6
Máx abs. (°C)	36.4	39.2	41.6	29.8	31.9	40.0	38.0	28.5	30.1
Mín abs. (°C)	14.6	17.5	17.6	2.8	1.2	17.6	18.7	2.8	2.9

Tabla 3: Temperaturas máximas y mínimas de algunos meses (2016-2018), ciudad de Orán.

Por su latitud, el recurso solar está disponible prácticamente todo el año. En la Figura 2 se tiene información sobre radiación de la provincia de Salta. Para Orán, los valores estimados de radiación solar global acumulada anual sobre plano horizontal rondan entre 1700 y 1800 kWh/m² año con valores mensuales promedios de entre 2,31 kWh/m² para junio y 6,83 kWh/m² para diciembre (Sarmiento Barbieri N. et al, 2017).

La disponibilidad de este recurso motiva la indagación y el estudio de nuevas formas y mecanismos para aprovechar esa fuente de energía limpia.

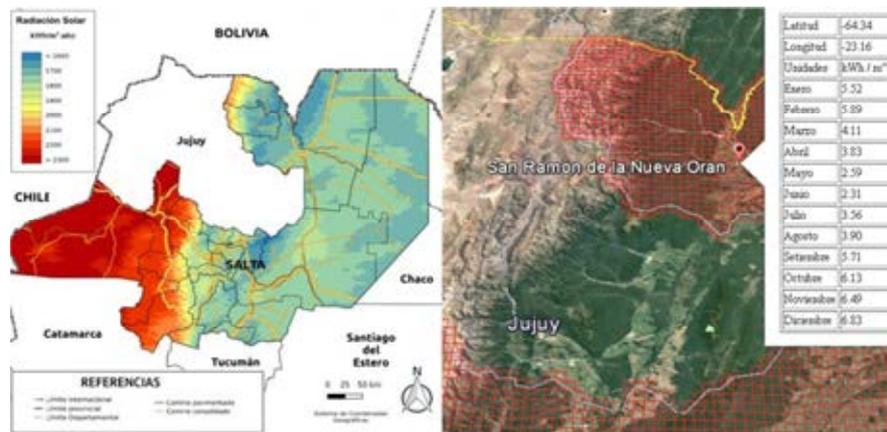


Figura 2: a) Estimación de Radiación global acumulada anual sobre plano horizontal para la provincia de Salta y b) valores mensuales promedio para la ciudad de Orán.

LA POBLACION DE ORAN Y SU RELACION CON EL CONSUMO ELECTRICO

La energía eléctrica posibilita el desarrollo de actividades humanas y, por lo general, contribuye a mejorar el bienestar de las personas, lo que lleva a un sistemático crecimiento en la demanda de este tipo de energía, demanda que puede o no coincidir con la Potencia instalada.

La Ciudad de Orán es el centro geopolítico más importante del norte de la provincia de Salta. Posee oficinas de la AFIP, ANSES, Banco Nación, INTA, Juzgado Federal, Sedes Universitarias, como la Sede Regional de Orán de la Universidad Nacional de Salta. Tiene un activo centro comercial y es punto de tránsito hacia la frontera boliviana. De acuerdo al Censo 2010 la ciudad de Orán tiene alrededor de 83.000 habitantes, de los cuales el 91% reside en la zona urbana. En la Figura 3 se observa la evolución de su población (Ministerio del Interior de la Nación, 2017). Esto que permite inferir el crecimiento urbano en las últimas décadas. Por ello, Orán es la segunda ciudad más importante de la provincia.



Figura 3: Evolución de población de la ciudad de Orán, Período 1960-2010.

Se sabe que el Sistema Eléctrico Nacional, tiene tres actores independientes: generadores, transportadores y distribuidores. Para el caso de Orán, los generadores pueden provenir de cualquier lado por estar interconectados, entre ellos Tabacal Agroindustria, Central Térmica de Orán y las reservas frías de la propia ciudad; el transportador es TRASNOA y el distribuidor es EDESA. Tabacal Agroindustria dispone de una planta de cogeneración (con gas natural), que fue inaugurada en 2011 y produce 20 MWh. Está ubicada en un punto estratégico para la red eléctrica de alta tensión del norte de Salta, funciona sólo durante la zafra (para autoabastecerse) y en casos de emergencias energéticas de las localidades vecinas (entre ellas Orán), cuando surgen dificultades técnicas en el Sistema Interconectado Nacional (Tabacal Agroindustria, 2015).

El incremento demográfico de las últimas décadas acompañado de las condiciones climatológicas actuales, ha llevado a que la infraestructura local para el suministro eléctrico en Orán resulte insuficiente. La demanda ha crecido notablemente y se acentúa en cada verano: para hacer frente a

jornadas calurosas y húmedas que caracterizan a esta zona se recurren al uso intensivo de equipos de refrigeración en cada espacio habitable, ya sean viviendas o ambientes de trabajo. Ante la emergente situación energética, en octubre del año 2016 se inauguró una nueva Estación Transformadora Eléctrica con 3 transformadores de 30 MVA cada uno. Según el presidente de EDESA “esta obra triplica la energía de Orán, donde la provincia tiene una demanda importante”. Con esto se pretende solucionar los problemas de suministro de energía que venían sufriendo los oranenses (Telam, 2016). Por otro lado, en el año 2017, se habilitó el funcionamiento de la Central Térmica Orán de 15 MW de potencia, Resolución SEE 0189/2017, vinculada al MEM⁶ a través de la barra de 13,2 kV de la Estación Transformadora Orán, jurisdicción de EDESA (Secretaría de Energía de la Nación, 2017).

A nivel nacional, la Fundación para el Desarrollo Eléctrico informó que la demanda de energía eléctrica registró un descenso del 2,7% durante enero del 2015. Sin embargo, en el NOA aumentó un promedio del 2,5%, teniendo en cuenta las demandas energéticas de las provincias Tucumán, Salta, Jujuy, La Rioja, Catamarca y Santiago del Estero (InformatoSalta, 2015). Para el periodo mayo 2015-2016, EDESA informó que Salta fue la provincia del interior con mayor aumento de consumo eléctrico, del 11% (El Tribuno, 2016), teniendo su cuota de participación la ciudad de Orán.

Situación de las energías renovables en Orán.

Analizando los requerimientos energéticos de un ciudadano oranense se puede estimar que utiliza energía eléctrica para cubrir la mayoría de sus actividades básicas: iluminación, climatización, limpieza, comunicación, esparcimiento y trabajo; mientras que otras, como el transporte, las resuelve alternativamente con energía proveniente de hidrocarburos (combustibles, gas natural). A nivel cultural, toda solución energética, tanto privada como pública, es pensada con electricidad proveniente de la red, por lo que no es común, o es poco imaginable, pensar en otra fuente energética como el sol. Las instalaciones fotovoltaicas o los calefones solares no son parte del contexto urbano local, como lo son en otras ciudades. Para casos de emergencia, las empresas privadas e instituciones públicas prioritarias, como hospitales o sanatorios, suelen tener sus propios grupos electrógenos a combustible fósil.

En la zona rural del departamento de Orán, la situación es un poco diferente. Como el tendido eléctrico no llega a todas las comunidades, es posible encontrar instalaciones fotovoltaicas provistas por ESED⁷, o adquiridas en forma particular por los propios habitantes, con el fin de cubrir sus necesidades energéticas básicas. La biomasa, por lo general, se usa para la cocción de los alimentos o alumbramiento.

PRIMERA EXPERIENCIA FOTOVOLTAICA EN LA SEDE UNIVERSITARIA

La Sede Regional Orán y la comunidad estudiantil.

La Sede Regional Orán (SRO) depende de la Universidad Nacional de Salta y ofrece carreras pertenecientes a diferentes Facultades: Exactas, Naturales y Salud. Su ubicación resulta estratégica porque a ella asisten estudiantes de las diversas localidades del Dpto. Orán (Aguas Blancas, S.R.N. Orán, Irigoyen, Pichanal, Urundel, Colonia Santa Rosa) como también de departamentos vecinos y de la provincia de Jujuy. En la actualidad su población estudiantil ronda alrededor de 600 alumnos, de los cuales el 60% procede de localidades vecinas. De marzo a junio ocurre su mayor concurrencia, disminuyendo notablemente en julio, para retomar la dinámica en el periodo agosto-noviembre.

En relación a las necesidades energéticas de los estudiantes durante su permanencia en la sede se pudo observar que, más del 90% disponen de dispositivos móviles y aproximadamente el 60% de una computadora. Como las clases están distribuidas a lo largo del día, con frecuencia resulta necesario realizar recargas de baterías, que suelen hacerse por turnos durante las clases, o bien durante los recesos. Por lo general, la cantidad de tomas existente en las aulas permite la conexión de equipos didácticos (proyector, computadoras, TV) y suelen estar ocupados prácticamente todo el día. En los pasillos y espacios abiertos no existen tomas.

⁶ MEM: Mercado Eléctrico Mayorista

⁷ ESED: Empresa de Sistemas Eléctricos Dispersos, compañía concesionaria controlada por EDESA.

Microsistema para la producción de energía eléctrica en la Sede: elección, estudio previo.

Por iniciativa de docentes de la carrera Tecnicatura Electrónica Universitaria (TEU) de la Sede, quienes están finalizando la Maestría en Energías Renovables⁸, y con el apoyo del Proyecto C.I.U.N.Sa N° 2338⁹, se instaló la “Centralita FVCel” en el patio delantero del predio de la Sede. Se trata de una Estación FV Off Grid para la carga de celulares disponible a toda la comunidad universitaria. El propósito fue disponer de un recurso a usarse en acciones de difusión sobre fuentes alternativas, como el sol, para la generación eléctrica, aún en zonas urbanas. Por ello se optó por un proyecto fotovoltaico atendiendo a criterios técnicos como:

- Descentralización: la energía fotovoltaica es una energía descentralizada, porque puede ser captada y utilizada donde se localice la demanda
- Costos: una vez instalado, el costo energético para su funcionamiento es nulo y el riesgo de fallas y su costo de mantenimiento son bajos
- Expansión: La expansión es modular pudiendo ser aumentadas de acuerdo a la demanda
- Relación con el ambiente: La energía obtenida es limpia, renovable y permanente.

Con la Centralita se ofrece a la comunidad estudiantil la posibilidad de realizar recargas durante los recesos entre clases, en un espacio abierto, accesible y visible, con energía proveniente de una fuente limpia y renovable, disponible para cualquier persona que desee hacerlo. El aprovechamiento de la energía fotovoltaica para la carga de dispositivos móviles en zonas urbanas no tiene tanta difusión en Argentina como suele ser en otros países. Pueden mencionarse la propuesta de carga de dispositivos móviles en zonas alejadas de la red (Rocabado S.et al, 2015).

Para estimar el consumo eléctrico de la estación se tuvo en cuenta las costumbres de los estudiantes, el rango de horario y los posibles dispositivos que requieren recargar. Se propuso un panel de distribución de 10 USBs, con requerimiento total máximo diario de 660 Wh/día (Tabla 4), un acumulador y un sistema FV de dos paneles (cuyas características técnicas se describen más adelante).

Panel USB	Cantidad	Potencia promedio (W)	Horas de uso (día)	Consumo energético (Wh/día)
USB1A	8	5	11	440
USB2A	2	10	11	220
			Total	660

Tabla 4: Requerimientos energéticos según la demanda de la población estudiantil de la Sede

Considerando recesos de aproximadamente de 20 minutos, se estiman 3 cargas/hora por cada conector. Para una provisión de 11 horas, se calcula un total de 330 cargas, con lo que, en líneas generales, se estaría abasteciendo al 55% de la población estudiantil con energía proveniente del sol. El tiempo de carga está limitado solamente por la disponibilidad del estudiante.

La “Centralita FVCel”: características técnicas.

La estación FV Off Grid cargadora de celulares está conformada por un sistema fotovoltaico, un acumulador, un panel de distribución y un regulador. Otros componentes que complementan son: un cartel luminoso LED y una lámpara autoabastecidos por la estación, mobiliario básico (repisa, mesa y sillas) y un banner informativo.

El **sistema fotovoltaico** está conformado por dos paneles de silicio policristalinos Marca Roy Solar, conectados en paralelo Los mismos han sido montados en la terraza de uno de los edificios de la Sede, orientados hacia el norte, con un ángulo de inclinación de 30° y sujetos a una estructura metálica, que está fijada directamente sobre el techo de la terraza. El soporte metálico es flexible y permite cambiar la graduación del ángulo (Figura 4). Cada panel presenta las siguientes características

⁸ En la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta.

⁹ Proyecto C.I.U.N.Sa N° 2338: Fuente energética y educación energética en contexto: dos ejes en un abordaje investigativo que abre paso a las energías renovables” 2017 a 2020. Directora: V. Javi

eléctricas en condiciones de ensayo estándar (STC: Standard Test Conditions) Irradiancia de 1000 W/m², 25°C:

- Potencia Máxima Nominal (P_{máx.}): 100Wp
- Tensión a Máxima Potencia (V_{mp}): 17,6V
- Corriente a Máxima Potencia (I_{mp}): 5,68 A
- Corriente de Cortocircuito (I_{sc})=5,97 A
- Tensión a circuito abierto (V_{oc})=21,1V
- Eficiencia del módulo (η)= 13,5%.

Las dimensiones de cada panel son: 1,10 x 0,67 x 0.035 m lo que da un área de colección de 0,737 m². La energía entregada al cabo de 8 horas por cada panel es 720 Wh/día, por lo que el sistema completo puede entregar hasta 1400 Wh/día.



Figura 4: Paneles instalados en la terraza, conectados en paralelo.

El **Sistema de acumulación** está conformado por una batería Moura de Gel, 12V, 26Ah, que si bien puede trabajar en el rango de 10,5 a 14,5V, se definió como rango de uso 11V a 13,5V por ser el más conveniente para la vida útil de la misma. De mediciones realizadas se obtuvo que puede abastecer 380 minutos de manera autónoma, sin recarga, para una carga de 55W nominal y 12V nominal.

El **sistema de distribución** está conformado por 10 conectores USB identificados con números y leds encendidos permanentemente para indicar si la estación está disponible, y que junto al sistema de Stand By, requieren aproximadamente de 1W (Figura 5). Las características eléctricas de los conectores son las que se concibieron en el diseño: 8 trabajan a 5V y pueden entregar corriente máxima de 1A (potencia de 5W), y 2 entregan hasta 2A (potencias de 10W).



Figura 5: Centralita FVCel, en uso por los estudiantes

ACCIONES DE DIFUSION DE LA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Las actividades de las sociedades humanas han generado impactos ambientales negativos a gran escala en este último siglo. La contaminación descontrolada de los recursos de nuestro planeta (aire, tierra, agua), la explotación y el consumo desmesurado de los mismos, la creciente generación de basura, el crecimiento acelerado de la población, entre otros, constituyen causas fundamentales de dicho impacto. En cumplimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático la República Argentina debe presentar cada dos años informes sobre las emisiones y absorciones de Gases de Efecto Invernadero, entre ellos, dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. En el Reporte

Bienal de Actualización 2016 se estimó que hasta el año 2014 el 55% de las emisiones corresponden al Sector Energía. Y además dan cuenta de una tendencia creciente en su serie histórica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina, 2017).

Ante este escenario, resulta indispensable plantear acciones concretas, a nivel micro y macro, tanto local, regional como nacional, en la línea del fomento de las energías renovables, su incorporación en las matrices energéticas de cada país y el uso eficiente y racional de la energía. Es por ello que desde la Sede Universitaria de Orán, durante el año 2017 se plantearon diferentes acciones de difusión usando como recurso didáctico la Centralita FVCel. En una primera etapa, se decidió llevar a cabo estas tareas con los estudiantes tanto del nivel secundario como terciario. Hoy se tratan de adolescentes y jóvenes que transitan su vida estudiantil de manera tranquila, pero en un futuro cercano se convertirán en adultos, que como ciudadanos, participarán en los diferentes circuitos políticos, económicos y socio-culturales, tendrán en sus manos la toma de decisiones que marcarán el rumbo de esta sociedad. Es de esperar entonces que de manera temprana interactúen con la tecnología fotovoltaica y logren estilos de vida a favor de las energías renovables.

Cartelera en la Centralita.

El uso racional de la energía puede disminuir el consumo, las facturas domésticas de energía y también ahorrar costes a niveles de Estado. Aún más, puede dar un impulso al empleo. Este uso racional tendría, al menos, dos vertientes: la mejora de la tecnología energética (eficiencia energética), y el cambio en el comportamiento del consumidor/usuario, que implica su formación y concientización (Curso OEA – Ejes para el Desarrollo Local con uso de Energías Renovables, 2017).

En la Centralita, el mensaje principal de la cartelera fue el aprovechamiento de la energía solar en forma gratuita, limpia, no contaminante. Se consideró de suma importancia enfatizar que se trata de una fuente inagotable, que contribuye al respecto y cuidado del medio ambiente, que para zonas rurales el uso de la tecnología fotovoltaica contribuye a mejorar la calidad de vida. Así también se colocaron algunos datos relevantes como el porcentaje de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, el porcentaje de la población de zona urbana, el tiempo que se transcurre dentro un edificio, entre otros, con la finalidad de invitar a tomar conciencia sobre el aumento del consumo energético y la necesidad de comenzar a indagar sobre otras fuentes de energía. También se instaló y programó un cartel luminoso autoabastecido, con mensajes de invitación a cargar los celulares con energía fotovoltaica. Como la centralita está instalada en el patio delantero, de la sede, toda persona que ingresa lo puede ver. La elección de la ubicación fue estratégica para la difusión (Figura 6).



Figura 6: Cartelera que acompaña la Centralita FVCel

La Energía Fotovoltaica en la Fericiencia Orán 2017.

Mediante Resolución N° SO 418/17 de la Sede se implementó la **Fericiencia Orán 2017**, en donde se recibió la visita de alumnos y docentes de diferentes instituciones educativas, tanto del nivel primario como secundario, medios radiales, empresarios de la zona y público en general.

A alumnos del nivel primario se les explicó con un lenguaje sencillo los componentes y el funcionamiento de la estación y la obtención de la Energía fotovoltaica, pudiendo apreciar su interés y escucha atenta y respondiendo a sus inquietudes. Con alumnos del nivel secundario, el trabajo fue un poco diferente. Mediante la indagación previa se buscó determinar su conocimiento previo del tema, para luego proseguir con la explicación del funcionamiento de un panel, el efecto fotovoltaico y la interconexión de los componentes de la estación. Luego, organizados en grupos, accedieron a la terraza donde están instalados los paneles. Finalmente, ya en la estación realizaron cargas de sus propios dispositivos móviles (Figura 7).



Figura 7: Difusión de la energía Fotovoltaica en la Fericiencia

También se estableció diálogo y nexos importantes con docentes del nivel secundario para tratar futuros temas relacionados con energías renovables. Por ejemplo, un docente de Escuela Técnica con orientación en Electrónica, luego de visitar la estación, decidió adquirir por cuenta propia dos paneles solares para enseñarles a sus alumnos el proceso de obtención de la Energía Fotovoltaica. A raíz de ello se puso en contacto con miembros del equipo de la sede para consultas y asesoramiento técnico.

Por otro lado, varios medios radiales asistieron a la jornada, por lo que se aprovechó para difundir el uso de la Energía fotovoltaica y la disponibilidad del recurso solar de esta zona, como también se enfatizó sobre la importancia de promocionar las energías renovables, la educación energética y adhesión a sistemas energéticos eficientes. Durante la exposición se analizó la problemática energética local, el desabastecimiento eléctrico debido al crecimiento en la demanda, las acciones desencadenantes de ello como los cortes eléctricos, caída de tensión en las horas pico y el malestar general en la población. Se concluyó haciendo referencia al umbral del agotamiento de las fuentes convencionales de energía, y la necesidad de explorar nuevas fuentes, como por ejemplo la proveniente del sol.

Durante la jornada de la **Fericiencia** se recibió la visita de algunos empresarios de la zona, que luego de recorrer los diferentes stands visitaron la Centralita, analizaron detalles técnicos, ventajas y viabilidad de la tecnología Fotovoltaica. Si bien la **Fericiencia** estaba destinada a alumnos de las diferentes instituciones educativas, resulta interesante destacar esta visita porque permite crear y fortalecer vínculos entre la ciencia y el mundo del trabajo, entre las renovables y el mundo empresarial local.

Visitas guiadas a la Centralita: charlas y muestras interactivas.

Las visitas guiadas constituyen una estrategia didáctica que permite asociar de una manera más significativa la teoría con la práctica, ver la “teoría puesta en práctica”. Y en ese proceso de comprensión y acercamiento se ponen en juego un abanico de habilidades cognitivas como el conocimiento, la observación, relación, identificación, análisis, reflexión, comunicación, transferencia, entre otros.

Esta modalidad es la que se ha aplicado con las instituciones educativas de la zona y de localidades vecinas, con previo acuerdo sobre el horario y la fecha. Se organizaron encuentros con estudiantes del Nivel Terciario (de carrera afín) de la localidad vecina de Pichanal, estudiantes del nivel secundario de la localidad vecina de Irigoyen y estudiantes locales de escuelas Técnicas y otras orientaciones. De

acuerdo al grupo de alumnos se define el contenido de las charlas y la secuencia de la visita: si se trata de alumnos que realizan tienen orientación en Electrónica, la charla incluye datos técnicos precisos y se mediciones con los equipos adecuados.

En cada visita, el grupo de estudiantes vino acompañado por un profesor. El expositor (miembro del equipo de la Centralita) comenzó la charla indagando sobre sus conocimientos previos acerca de la tecnología fotovoltaica. La gran mayoría identifica los paneles solares, pero desconoce cómo es el proceso de generación, por lo que se les muestra cada componente de la estación: los paneles en la terraza, el gabinete con cada componente y su interconexión; solo en casos puntuales se realizaron mediciones. A modo de cierre se les invitó a cargar sus celulares, a reflexionar sobre la importancia de trabajar con otras energías alternativas. Finalmente se atendieron inquietudes personales y se les entregó un folleto con información básica (Figura 8).



Figura 8: Diferentes instancias de las visitas Guiadas

CONCLUSION

Desde hace unos años a través de diferentes políticas gubernamentales se ha comenzado a incentivar fuertemente la inversión en Energías Renovables, entre ellas la Fotovoltaica. Esto moviliza a estudiar el contexto circundante, los recursos renovables disponibles en la zona, las posibilidades y limitaciones, como también analizar los cambios culturales que se generan en las personas. En relación a las características climatológicas, obtenidas de fuentes oficiales, se puede apreciar que en la Ciudad de Orán se dispone del recurso solar durante casi todo el año con valores aceptables de radiación. Pero esta fuente es solo aprovechada en la zona rural, ya sea por iniciativa gubernamental o particular. En la zona urbana, prácticamente todo problema que requiera electricidad se resuelve con la obtenida de la red. El ahorro energético, sobre todo en las viviendas, es movido por los altos montos de las facturas a pagar. De educación energética poco se habla. Se detecta que los visitantes conocen algunos dispositivos solares, pero que desconocen los procesos que explican el aprovechamiento de la energía solar. Esta información aporta datos a tener en cuenta en caso que se aborde la temática en alguna acción de comunicación social de saberes de las energías renovables.

El uso de un sistema de fotogeneración en pleno centro urbano encuentra en estas prácticas un logro auspicioso y promisorio. Frente a los nuevos costes de la energía de red, el grupo se plantea un análisis económico comparativo para completar las argumentaciones que se comparten durante las acciones de difusión.

Desde la Sede, las tareas de difusión de uso de las renovables en zonas urbanas están en sus inicios, y en próximos meses se trabajarán con nuevos dispositivos que incluyan la educación energética como eje central de una sociedad. Seguramente se requerirá un trabajo intenso: acciones de difusión de los dispositivos e instalaciones fotovoltaicas, acciones para generar conciencia de la situación energética actual a nivel local, planteamientos de miradas y cambios educativos, culturales y sociales que centren la mirada en tres líneas de trabajo: ahorro energético, uso de las renovables y eficiencia energética.

Agradecimientos

Principalmente se agradece la colaboración de alumnos de la carrera Tecnicatura Electrónica Universitaria de la Sede Regional Orán de la Universidad Nacional de Salta, que trabajaron de manera muy comprometida, tanto en la instalación y puesta en marcha como en las diferentes acciones de difusión. Ellos son: Pablo Martínez, Leandro Moya, Nicolás López, Daniel Castro y Enzo Rodríguez. También un agradecimiento al Prof. Eduardo Gómez.

REFERENCIAS

- Boletín Oficial de la República Argentina. <https://www.boletinoficial.gob.ar/#!DetalleNorma/154882/20161130>. Resoluciones N° 136 E/2016 y N° 281 E/2016. 20/11/16. Recuperado 10/07/2017.
- Curso OEA – U.N.Sa: Ejes para el Desarrollo Local con uso de Energías Renovables, 2017.
- El Tribuno de Salta (2016). <https://www.eltribuno.com/salta/nota/2016-6-28-1-30-0-salta-lidera-el-aumento-del-consumo-de-energia-electrica>. Consultado el 14 de agosto de 2018.
- Godfrin E. M., Eyras I. H., Durán J.C. (2016). Sistema fotovoltaico conectado a red en el Palacio de Hacienda: análisis de la generación en un año y estudio de sombras. XXXIX Reunión de ASADES. Vol. 4, pp. 13.23-13.28, 2016. Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5
- Fedrizzi M. C., Zilles R., Sauer I. L. (2006). Implantação de sistemas de bombeamento fotovoltaico em comunidades tradicionais - questões a se considerar. AVERMA Vol. 10, 2006. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Huacuz Villamar Jorge. (1999). Generación eléctrica distribuida con energías renovables. Boletín IIE. Pp. 216-222.
- InformateSalta (2015). <http://informatesalta.com.ar/noticia/9867/crecio-un-7-el-consumo-electrico-en-salta>. Consultado el 14 de agosto de 2018.
- KPMG. (2017). Inversiones en fuentes de generación en el sector eléctrico nacional. Energía, electricidad y servicios públicos. Informe Especial. <http://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2017/06/KPMG.-Informe-Especial.-Inversiones-en-Generaci%C3%B3n-El%C3%A9ctricas.-27-de-Junio-2017.pdf>. Recuperado 10/07/2017.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina. <http://ambiente.gob.ar/>. Recuperado 26(10/2017).
- Ministerio de Justicia y Derechos Humanos (2017). Infoleg. http://www.infoleg.gob.ar/?page_id=112
- Ministerio del Interior de la Nación (2017). Fuente: elaboración propia en base a datos del INDEC. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, <http://www.mininterior.gov.ar/municipios/masinfo.php?municipio=SAL051>
- Morante Trigoso F, Brito Quaglia R., Moura de Moraes A., Ferreira de Olivera S. E. (2008). Panorama da geracao distribuida no Brasil utilizando a tecnologia solar fotovoltaica. II Congresso Brasileiro de Energia Solar. Florianópolis.
- Rampinelli G. A., Krenzinger A., Prieb C.W.M., Bühler A. J. (2013). Implantação de sistemas de geração distribuída com telhados fotovoltaicos no sul do Brasil. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la ASADES Vol. 1, pp.04.09-04.16, 2013. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5
- Righini R., Roldán A., Raichjk C., Grossi Gallegos H. Y Schiavi N. (2008). Energización sustentable en comunidades rurales aisladas del Delta del paraná con fines productivos. II Congreso brasileiro de Energía Solar. Florianópolis. Brasil. ISBN 978 – 856217900-6.
- Rocabado S., Díaz J. y Cadena C. (2015). Cargadores solares portátiles para el uso de dispositivos móviles en zonas rurales aisladas del NOA. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de ASADES . Vol. 3, pp. 04.179-04.190, 2015. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5
- Ruiz Cintia Y. (2009). Análisis económico de los servicios ambientales de la selva tucumano oranense (Yungas). Municipio de Orán. Departamento de Orán. Tesina de grado. Biblioteca de la Facultad de Ciencias Naturales. U.N.Sa.
- Sarmiento Barbieri N.; Belmonte S.; Dellicompagni P.; Franco J.; Escalante K. (2017). Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta. Sistema de Información Geográfico Digital. Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional. CONICET- U.N.Sa. Salta. Argentina.

- Schmukler M. y Garrido S. (2015). Energías renovables y políticas de electrificación rural en Argentina. Análisis de la trayectoria socio-técnica del Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER). Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo ASADES. Vol. 3, pp. 12.81-12.92, 2015. Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5
- Secretaría de Energía de la Nación (2017). [http://www.enre.gov.ar/web/bibliotd.nsf/\(\\$IDWeb\)/40B4CCB9A676EC98032580F000549AEC](http://www.enre.gov.ar/web/bibliotd.nsf/($IDWeb)/40B4CCB9A676EC98032580F000549AEC). Consultado el 14 de agosto de 2018.
- Secretaría General de la Gobernación. (2014). Boletín Oficial N° 19.351. www.boletinoficialsalta.gov.ar
- Serpa Paulo. (2006). A apropriação tecnológica por comunidades tradicionais em aplicações de sistemas fotovoltaicos domiciliares. AVERMA Vol. 10, 2006. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Servicio Meteorológico Nacional (2018). Datos climatológicos San Ramón de la Nueva Orán. <https://ssl.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/?mod=turismo&id=7&provincia=Salta&ciudad=Or%>. Consultado el día 12 de agosto de 2018.
- Tabacal Agroindustria (2015). <https://blog.tabacal.com.ar/index.php/tag/energia/>. Consultado el 13 de agosto de 2018.
- Telam (2016). Agencia Nacional de Noticias. <http://www.telam.com.ar/notas/201610/168555-salta-inauguracion-central-electrica.html>. Consultado el 14 de agosto de 2018.-

ABSTRACT

The electricity supply of the city of Orán comes entirely from the Network. The use of renewable energies in the urban area is almost nil, only photovoltaic microsystems are used in the rural area. With the purpose of initiating dissemination actions on the use of alternative sources, such as the sun, university professors carry out the assembly of the Centralita FVCel on the headquarters premises. It is an Off Grid FV Station for cell phone charging, easily accessible and available to the entire university community. During 2017, it was used as an indispensable resource for the diffusion of photovoltaic energy in educational institutions of the Primary, Secondary and Tertiary levels and the community of Orán. Through conferences, lectures, guided tours, interactive exhibitions and fairs, an effort was made to publicize alternative sources and raise awareness about their availability and convenience of use.

Keywords: Solar Energy, Off Grid FV Station, Diffusion, Education

EJERCICIOS EDUCATIVOS ALREDEDOR DEL CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES

V. M. Javi¹, R. Rodríguez Soler², I. J. Arroyo y G. A. Pastrana³.

Laboratorio Multimedia - Instituto de Investigaciones en Energías no Convencionales (INENCO)
Consejo de Investigaciones de la U.N.Sa (CIUNSA). Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia
5150. C.P. 4400 – Salta

Tel. 03871-4255424 – Fax 02387-4255449 e-mail: veroja@gmail.com; rocio.rsoler@gmail.com

Recibido 07/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: Se presentan dos acciones enmarcadas en un mismo acometido de educación energética en contexto: cuatro talleres por rango etéreo para cuatro poblaciones de la Comunidad kolla Tinkunaku del Departamento de Orán, provincia de Salta y una capacitación sobre física básica en el Centro Educativo FyA de la periferia de Salta Capital. El constructivismo y la educación acción operan como marcos contenedores de una matriz teórica que se enriquece con nuevos enfoques: la enseñanza para la comprensión, el trabajo colaborativo y los multiambientes de aprendizaje, entre otros. Temáticas medio ambientales, el uso y ahorro de energía junto con las energías renovables aportan a la motivación de los asistentes; las simulaciones y otras herramientas TICs aparecen como herramientas sostenedoras, junto con aspectos lúdicos y contextuales. Los 16 talleres dictados y la capacitación ofrecida validan formatos educativos innovadores y logran aceptación en estudiantes, miembros de las comunidades y autoridades de las escuelas / colegios.

Palabras clave: educación energética en contexto, energías renovables, medio ambiente, uso de TICs.

INTRODUCCIÓN

Es conocido el potencial que resulta de imbricar temáticas medioambientales con aquellas relativas al ahorro de energía y el uso de energías renovables (ER). Más específicamente, abordar la enseñanza de temáticas como la energía, las energías renovables y su uso efectivo, el ahorro de energía, con base en la física ha posibilitado un conjunto de prácticas de enseñanza y aprendizaje que van habilitando nuevos formatos y nuevas estrategias a partir de la consideración de conceptos globales y demandas locales. Con foco en estas temáticas, desde la educación formal y no formal se abren variadas oportunidades para desarrollar prácticas educativas con objetivos formativos y formatos diversos (Capuano y Ríos, 2016).

Este trabajo relata dos vertientes de estas prácticas que pretenden ser transformativas: la capacitación a estudiantes secundarios solicitada por el Centro FyA (Fe y Alegría) del barrio Solidaridad en la periferia de Salta Capital y el dictado de talleres sobre el cuidado del medioambiente y las energías renovables (ER) en el marco del Proyecto Educación para el Medio Ambiente y el uso de las Energías renovables (EDUMAyE). EDUMAyE es un Proyecto de Extensión de la Universidad Nacional de Salta que reúne iniciativas comunes con universitarios de la Universidad de Granada, entre otros. Ambas, recogen anteriores experiencias que van ajustando y fortaleciendo el que hacer y el marco teórico de los docentes, pero también agregan elementos nuevos que deben ser evaluados en su efectividad en el aprendizaje, tal es el caso del uso de videos o simulaciones. Los ejercicios educativos se sustentan en la investigación acción y el constructivismo como marcos teóricos amplios y contenedores que van permitiendo recoger y sumar otros enfoques que fundamentan y validan prácticas, enriquecen y sustentan nuevos métodos con hallazgos reconocidos (Javi et al., 2018).

¹ Docente Investigadora U.N.Sa. Directora Proyecto CIUNSA N° 2338.

² Doctoranda de la Universidad de Almería, España. Miembro del Proyecto CIUNSA N° 2338.

³ Estudiantes de la Facultad de Ciencias Exactas U.N.Sa. Miembros del Proyecto CIUNSA N° 2338.

MARCO TEÓRICO CONTENEDOR Y NUEVAS APORTACIONES

La investigación acción y el constructivismo como teorías subyacentes

Según la definición de Halsey, A. H. (Halsey citado en Cohen y Manion, 1990) investigación acción es “la intervención a pequeña escala en el funcionamiento del mundo real y un examen próximo de los efectos de tal intervención”. Algunos rasgos importantes de la misma son:

- Es situacional. Se preocupa de la diagnosis de un problema en un contexto específico e intenta resolverlo en ese contexto.
- Es colaboradora. Los equipos de investigadores y practicantes trabajan juntos en un proyecto.
- Es participativa. Los mismos miembros del equipo toman parte directa o indirectamente en la ejecución de la investigación.
- Es autoevaluadora. Continuamente se están evaluando las modificaciones dentro de la situación en cuestión.

La investigación acción tiene múltiples ámbitos de aplicación, agrega conocimiento funcional al conocimiento práctico, es decir conocimiento en la práctica de los fenómenos involucrados. Su foco es un problema específico en un escenario específico, por tanto, no se trata de obtener un conocimiento generalizable. Su rasgo principal es que se trata de un procedimiento para abordar un problema concreto en un contexto dado, es decir es un procedimiento “en el acto” (Cohen y Manion, 1990). El proceso de investigación se sigue en forma constante sobre períodos variables de tiempo. Sin embargo, es posible hacer extensa la cobertura de un proyecto con lo que se podrá producir conocimiento e información más generalizable. En ambas líneas de trabajo, de la mano de la investigación acción, se trata de llevar adelante una innovación a partir de haber detectado una carencia o necesidad en un contexto particular.

La investigación acción posibilita una construcción creciente del conocimiento pasando por negociaciones, diálogos, retrocesos y retornos al objetivo buscado, siempre en situaciones de enseñanza aprendizaje. Se construye a través de cuatro fases: la planificación, la actuación, la observación y la reflexión, cada una con características especiales de acuerdo a las dos líneas de trabajo abordadas (el Proyecto EduMAyE y la capacitación en el Centro FyA). Durante los avances del proceso de investigación acción los docentes vuelven una y otra vez sobre algunos elementos: conceptos físicos integradores, conceptos relativos a la Educación Medio Ambiental, dispositivos solares como recursos áulicos, el uso de TICs, el multiambiente de aprendizaje, la enseñanza para la comprensión, el Trabajo Colaborativo.

El constructivismo enuncia que los individuos aprenden significativamente cuando son capaces de encontrarle sentido a un conocimiento nuevo al conectarlo con lo que ya saben. El conocimiento previo es clave en la capacidad del sujeto para asimilar nueva información de forma duradera y eficaz. Así, la incoherencia entre las ideas previas y los conocimientos que se deben enseñar supone un serio obstáculo para el desarrollo de un aprendizaje significativo. Debe decirse también que los científicos poseen múltiples formas explicativas en relación con un mismo fenómeno (Romero Ariza y Quintana Armesteros, 2014). El objetivo de la enseñanza de las ciencias, desde el constructivismo, al cual adhieren los autores, es dotar al individuo de nuevos modelos explicativos para interpretar el mundo (Gómez-Crespo *et al.*, 2004 citado en Romero Ariza y Quintana Armesteros), en particular el mundo energético actual.

Otros enfoques teóricos que van enriqueciendo las prácticas educativas sobre energías renovables

Un elemento importante en las prácticas, es el enfoque del Trabajo Colaborativo. Se trata de un trabajo reflexivo y práctico entre las instituciones participantes que da lugar a la presencia de los docentes innovadores que asesoran y comparten, dudan y consultan, proponen y adaptan (Chaile, 2007). Otro punto para el trabajo colaborativo es la conciliación de intereses entre los niveles/instituciones teniendo, como punto de partida reales prácticas propias de cada nivel/institución. Se busca la superación de modelos de trabajo aislados, reemplazados por aquéllos donde se comparten modos de interpretar y metas a lograr. Por su parte, el universitario busca interactuar a través de un modelo que supere el intercambio desde el “perito” hacia el “práctico”, desdibujando la sola imagen de validez de

la experticia. Se propone avanzar en el entendimiento de un espacio común de vinculación a través de la colaboración profesional, una interrelación que le permita a los docentes potenciar sus conocimientos sobre aspectos que remiten a lo metodológico didáctico de las ciencias a partir del empleo actualizado de recursos y a la consideración de otros nuevos. Pero también y más aún en este caso, al incorporarse las ER, a la inclusión de nuevos saberes específicos de las ER tomando como base explicaciones científicas de la física (Javi V., 2013).

Se agrega también, como metodología de abordaje el multiambiente de aprendizaje (Brito Leño, 2004); es decir un aula expandida alrededor de actividades experimentales sencillas y/o videos / simulaciones que desafíen la comprensión del estudiante. Los dispositivos solares son excelentes materiales didácticos a ser capitalizados en esta aula expandida, ya sea en dispositivos en dispositivos a escala real o en su versión mino (mini cocinas solares, mini secaderos, calefones con botellas pets, etc). La motivación de los estudiantes – sean jóvenes y adultos – juegan aquí un importante rol.

Una de las preguntas más enriquecedoras en el proceso de enseñanza de las ER es ¿qué es comprender el concepto “energía”? Desde el marco teórico de la enseñanza para la comprensión (Stone Wiske, 2005) se enuncia: “comprender un tema es poder realizar una presentación flexible de él: explicarlo, justificarlo, extrapolarlo, relacionarlo y aplicarlo de maneras que vayan más allá del conocimiento y la repetición rutinaria de habilidades. Comprender implica poder pensar y actuar flexiblemente utilizando lo que uno sabe en un nuevo contexto. Otro concepto de la enseñanza para la comprensión de fuerte potencial es el de “tópico generativo” - un tema rico, inagotable que presente cada vez aristas nuevas o complementarias que motiven al estudiante – y el de los llamados desempeños para la comprensión. Justamente, los dispositivos alimentados con energías renovables son tópicos generativos que favorecen el logro de los nuevos desempeños buscados como metas de una enseñanza constructivista (Stone Wiske, 2005).

Lemke y la semiótica social

Desde la semiótica social, Jay L. Lemke aporta elementos clave para el estudio de las ciencias. Destacaremos dos: su mirada sobre lo que es un concepto científico y la cuestión motivacional. La semiótica social propone que cada objeto o acción es un signo que tiene un significado que va más allá de sus propiedades como objeto material o como proceso. Algún sistema socialmente construido interpreta este significado adicional. Se trata de algo que se aprende como miembro de comunidades y que finalmente las caracteriza. El lenguaje es un recurso semiótico y los modos en los que los científicos usan el lenguaje indica la comunidad disciplinar. Cada palabra, dibujo, diagrama, mapa y representación simbólica es rica en significados en diferentes contextos. Respecto de la energía, desde el punto de vista semiótico no hay un fenómeno real correspondiente al concepto energía: hay un complejo fenómeno que puede ser interpretado o construido de acuerdo a varios discursos y esquemas simbólicos que usan la noción de energía. Debe realizarse un trabajo para encontrar equivalencias que interpreten la energía. Este trabajo es el producto de una larga tradición histórica – la ciencia - que nos enseña cómo usar efectivamente estas representaciones. Lemke propone que el estudiante necesita ser “tocado” por diferentes instancias físicas de energía: medirla en distintas situaciones, utilizar la palabra energía para describir aspectos diferentes de un fenómeno, escribir ecuaciones para cada tipo de sistema, dibujar diagramas, representar matemáticamente la energía en cada caso. Así, el concepto energía se construye gradualmente. Este autor recomienda fuertemente tener en cuenta, también, los intereses de los estudiantes y hacerlos practicar combinando el lenguaje científico, el contenido temático y valores en actos que directamente afecten sus vidas ya que la educación científica debe prepararlos para que usen la ciencia como ciudadanos críticos (Lemke, 1997).

CONTEXTOS INSTUTUCIONALES DE LAS CAPACITACIONES

El proyecto EduMAyE-2

EduMAyE (Educación para la conservación del Medio Ambiente y el uso de Energías renovables) es un proyecto educativo cuyas líneas de investigación y de acción son la conservación del medio ambiente y el uso de las energías renovables. Pretende complementar y fortalecer la educación formal y defiende la educación democratizadora y bidireccional en la cual todas las personas tienen un papel

fundamental. Atendiendo a tales premisas, se trabaja con conceptos globales desde la realidad local comunitaria.

La tarea educativa se articula mediante la reflexión y la acción. La reflexión se produce en torno a conceptos como territorio, naturaleza, energía, sustentabilidad, cambio climático y medioambiente. La acción se materializa mediante la ejecución de talleres ad – hoc organizados en cuatro pueblos de la Comunidad kolla Tinkunaku ubicados en Departamento de Orán, provincia de Salta: Angosto de Paraní, Río Blanco, San Andrés y Los Naranjos (Figura 1). En cada comunidad se concurre a las escuelas albergues primarias y secundarias, que funcionan en un mismo predio que irradian acciones de interés educativo y de políticas públicas.

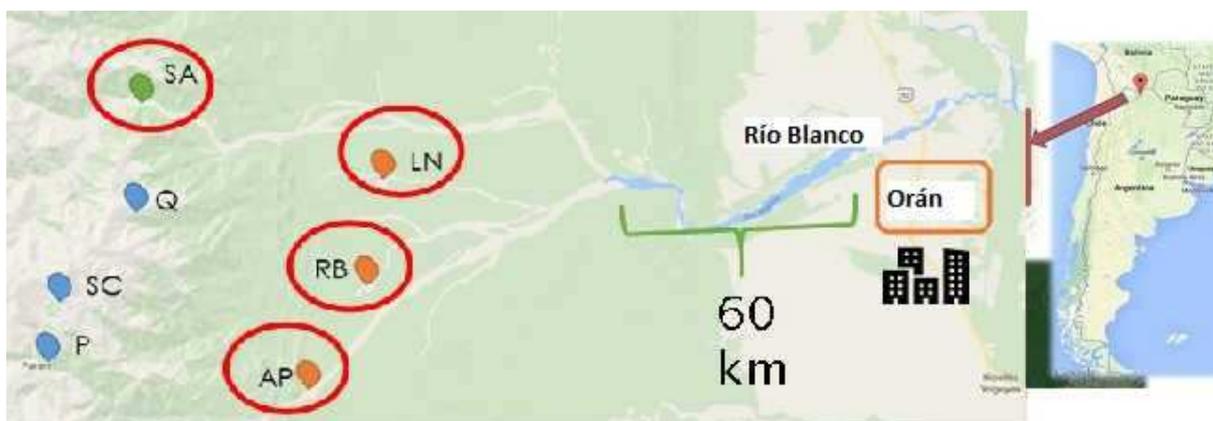


Figura 1: Ubicación de los cuatro pueblos de la Comunidad kolla Tinkunaku, en el Departamento de Orán, provincia de Salta.

EduMAyE se gesta en 2014 en el seno de otro proyecto educativo: *La Travesía Andina* que realiza la asociación española *Subiendo al Sur* en pueblos originarios de las provincias de Jujuy y Salta. Se visitan las cuatro comunidades originarias que forman parte de la CIPKT (Comunidad Indígena del Pueblo Kolla Tinkunaku) con el objetivo de hacer un relevamiento de necesidades y la disposición de los habitantes a aprender y participar. En 2015, con apoyo de la Universidad de Granada (España), se trabaja en las comunidades durante cuatro meses. En 2016 la Universidad Nacional de Salta (U.N.Sa) se une a través de EduMAyE -2, un proyecto de extensión, con implicación de estudiantes de la Energía Solar (TUES) y la Licenciatura en Energías Renovables (LER) del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la U.N.Sa. A partir de 2017 las acciones se enmarcan en el Proyecto CIUNSa N° 2338⁴.

El objetivo principal del proyecto EduMAyE-2 es contribuir al desarrollo sustentable de la CIPKT mediante la educación en contexto y aplicación del conocimiento científico y contribuir a formar ciudadanos que:

- Estén comprometidos con el medio ambiente.
- Impulsen el uso de las energías limpias.
- Sean críticos con el consumismo y valore la reutilización.
- Luchen contra el cambio climático.
- Sean conscientes de la importancia de acciones locales para las problemáticas globales.
- Apuesten por el desarrollo sostenible.

Como objetivos transversales se pretende crear nexos de unión entre la población kolla y la comunidad universitaria local e internacional y fomentar la innovación y la inclusión educativa.

⁴ Proyecto CIUNSa N° 2338: “Fuente energética y educación energética en contexto: dos ejes en un abordaje investigativo interdisciplinar que abre paso a las energías renovables”. Directora V. Javi.

Aprendizaje significativo de física para cuidar nuestro entorno en el Centro educativo FyA

La física es una asignatura que muchas veces es abordada solamente desde la resolución de problemas con una gran carga de matemática lo que provoca que los alumnos la consideren aburrida y cuando no difícil y poco agradable. El replicado y aplicación de ecuaciones a modo de recetas profundiza la mecanización de su aplicación y aleja a los estudiantes de la posibilidad de especular con las variables y las predicciones, de aprender a observar una porción de la naturaleza con visión crítica. Peor aún, esta práctica fortalece la imagen de la ciencia como un corpus teórico casi inabordable. La superación de ese dictado mecanicista y una participación activa por parte de los estudiantes fueron los objetivos de logro que las autoridades del Centro Educativo FyA solicitaron a los docentes del curso taller del INENCO (Instituto de Investigaciones en Energías no Convencionales) – U.N.Sa. Las actividades y experiencias propuestas pretenden aprovechar los conocimientos y experiencias del alumno, adquiridos fuera o dentro de la escuela. Que descubran que se puede hacer física disfrutando y aprendiendo, logrando desarrollar la observación, la imaginación y la creatividad. Por otra parte, se busca contribuir a la difusión de la física, la educación energética y fomentar la comunicación de los productos científico – tecnológicos. Se proponen tres temáticas:

- La energía como concepto transfenomenológico, presente en todos los fenómenos de la naturaleza, pero orientados a una educación energética que ayude a concientizar sobre el ahorro de energía y los beneficios del uso de las llamadas energías limpias.
- La naturaleza dual de la luz, la luz que proviene del sol, su efecto sobre los tejidos vivos, dispositivos modernos (leds, láseres, sensores ópticos, paneles fotovoltaicos, etc.).
- La estática y la dinámica básica de fluidos aplicadas a comprender la atmósfera y la hidrósfera y su influencia en la contaminación /polución ambiental. El efecto invernadero.

Se trata además de hacer uso del lenguaje, de gráficos explicativos, de diagramas, de expresiones matemáticas que den cuenta de variables, parámetros, leyes y teorías en forma gradual y creciente. De este modo, al decir de Lemke (1998), que el estudiante “viva” y experimente sobre ciertos conceptos, lo midan, den explicaciones escritas, verbales, a través de esquemas o representaciones simbólicas. La reiterada interacción con los conceptos físicos ayuda al estudiante a construir representaciones de esos conceptos aún en situaciones novedosas.

DESARROLLO y RESULTADOS DE LOS EJERCICIOS EDUCATIVOS

Los talleres del Proyecto EduMAyE-2 en la comunidad kolla Tinkunaku

Las actividades buscan alcanzar los objetivos mentados con talleres que se dictan por rangos de edad en cada uno de los pueblos, es decir cuatro en cada comunidad:

- Grupo 1: de 6 a 8 años. (Escuela primaria)
- Grupo 2: de 9 a 12 años. (Escuela Primaria)
- Grupo 3: de 13 a 20 años. (Colegio secundario)
- Grupo 4: Adultos.

Las cuatro fases de la investigación acción adaptadas al proyecto EduMAyE-2 son:

- A) Acuerdos con la Comunidad: se presentan las intenciones y la temática en centros educativos y en el consejo comunitario. Se acuerdan fechas y horas para la realización de las actividades y los talleristas participantes (a partir de agosto de 2016 aprovechando la temporada seca que permite el ingreso a los pueblos; 4 personas; teléfono y computadora); se acuerda también oficialmente el alojamiento y la manutención de los talleristas ya que no existen albergues u hostales en esas localidades.
- B) Determinación de la temática a tratar: Se determina una temática focal en torno a la cual se desarrollan las actividades. Se propone la temática de las fuentes de Energías Renovables y sus posibles usos desde la realidad local.
- C) Creación y diseño de actividades: Se trata de un proceso creativo en el que solo existe de manera pre-establecida la temática.
- D) Realización de las actividades en campo.
- E) Reflexión y ajustes permanentes entre talleristas, docentes de las comunidades educativas

involucradas, estudiantes, referentes comunitarios.

De este modo, EduMAyE-2 trabaja con el conocimiento de las fuentes de energía y la relación de las realidades locales con éstas. Así, el sol, los ríos, la tierra, los residuos orgánicos y el viento se posicionan frente al petróleo y otras fuentes de energías de uso generalizado tanto para la producción de calor como de electricidad. Además, se transmite de manera intrínseca la filosofía de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar), mostrando en todo momento que el mejor residuo es el que no se genera y la reutilización como paso previo a la eliminación de los residuos. No obstante, teniendo en cuenta la realidad de los pueblos, se focaliza este pensamiento en la reutilización.

En los talleres los participantes interactúan con estas temáticas de manera práctica y creativa, haciendo que ellos mismos piensen la manera de llegar a producir energía y entablando así un diálogo constante con el alumnado. Los receptores de los talleres son, a su vez, los protagonistas y guionistas del taller. Se trata de un conocimiento que, aunque tiene una serie de pasos definidos, permite la libertad de la construcción grupal y la experiencia única.

El diseño de los talleres requiere pensar los procesos / estrategias pedagógicos para lograr un conjunto de actividades amenas, motivadoras, accesibles y efectivas a los propósitos del proyecto. A partir de experiencia previa del EduMayE, existe un borrador de las actividades sobre el que se puede valorar y evaluar cuantitativamente algunos recursos pedagógicos. Una de las evidencias que se tiene es la potencia del material audiovisual tanto en apoyo al dictado de los talleres como para el registro de imágenes que sirvan para memoria del proyecto y futuras divulgaciones. Se realizan, como mínimo, 4 tipos de talleres por y para las cuatro comunidades destinatarias. Todos los talleres se ensayan antes de la ejecución y son susceptibles de ajustes y modificaciones una vez se comience a realizarlos (la evaluación forma parte del trabajo de todos los miembros del equipo). Se hace uso de herramientas audiovisuales, juegos, charlas formativas, y/o debates con los participantes.

Los talleristas son, al menos dos por pueblo: una estudiante avanzada de la Universidad que deviene Licenciada y Magister en transcurso de los proyectos EduMAyE y EduMAyE2, estudiantes y docente de la Facultad de Ciencias Exactas de la U.N.Sa. En la Tabla 1 se presenta, a modo de ejemplo la secuenciación de actividades del taller destinado a adolescentes “Geográficamente energético” en el que se vinculan fuentes de energía, actividades de la vida diaria y tres sitios con recursos naturales y contextos diversos: un pueblo en la puna jujeña (San Juan y Oros), un pueblo en Marruecos (Tajmud) y un pueblo en Alemania (Wildolsried). Cada uno se presenta a través de sendos videos (Figura 2) y además se lee una breve reseña sobre sus recursos principales, siguiendo la secuencia programada.

Introducción	Presentación, juego rompe-hielo y definición de fuente energética	15'
Geografía	Asimilar el lugar en el que reside cada equipo	10'
Energía localizada	Elección de fuentes energéticas para poder realizar las acciones de la mesa A	15'
Explicación	Argumentación de la elección	10'
Debate	Cruce de opiniones entre los participantes	15'
Cierre	Visualización de uno o más videos	10'

Tabla 1: Actividades del taller para adolescentes Geográficamente energético



Figura 2: captura de pantalla de los videos referidos a aplicaciones de ER en Tajmud, Wildpoldsried y San Juan y Oros.

Una síntesis de los talleres dictados, de acuerdo a las edades de los destinatarios, los recursos utilizados y los asistentes se presenta en la Tabla 2.

EDADES	TALLER	PREMISAS	RECURSOS
1°, 2° y 3° grado	El Doctor de la Energía	<ul style="list-style-type: none"> • Relajación. • Distribución en 2 equipos. • Juego: Tenis con tela y consultas al Dr. de la energía. • Video • Intercambio de opiniones 	Telas Pelota Video
4°, 5° y 6° grado	Supervivencia Energética	<ul style="list-style-type: none"> • Explicación indirecta de que es una fuente de energía. • Separación en grupo a través de una dinámica. • Se relaciona una actividad cotidiana con una fuente de energía disponible. • Puesta en común de las fuentes seleccionadas 	Video Tarjetones Actividad vs. Recursos Energéticos
7° grado Secundario	Geográficamente Energético	<ul style="list-style-type: none"> • Presentación y sociabilización. • Concepto de Energía • Zonas geográficas y Relación energética. • Video • Debate 	Pizarra Tarjetones Actividad vs. Recursos Energéticos Video
Adultos	Fuentes de Energía y usos	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de energía • Dialogo acerca de si conocen otras energías. • Exposición de tarjetas • Videos de Cocina mejorada y calefones s. • Debate y Actividad colectiva 	Tarjetones Actividad vs. Recursos Energéticos Video

Tabla 2: resumen de los cuatro talleres dictados.

Además del uso de videos, un recurso exitoso es la representación de necesidades energéticas y fuentes a través de sencillas tarjetas que los participantes manipulaban en los talleres **Supervivencia energética**, **Geográficamente energético** y **Fuentes de Energía y usos**. Las tarjetas se muestran en la Figura 3. Entre los más pequeños, el Dr. de la Energía tiene gran aceptación y aún en el taller de adultos las tarjetas permiten disparar interesantes discusiones (Figura 4). Los talleres se diseñan para grupos de 10-15 personas ya que las clases no son muy numerosas. En algunos casos se hace necesario unir dos clases de niveles próximos para la realización de los talleres. En el caso de los talleres para adultos, el número de asistentes es más variable. En muchos casos, las personas se van uniendo al

taller una vez que ya ha comenzado. Se estima que el número de asistentes por municipio varía entre los 5-6 de Los Naranjos a los más de 25 de Río Blanco.



Figura 3: conjunto de tarjetas como material para usar en los talleres EduMAyE.



Figura 4: Los talleres El Dr. de la energía y Fuentes de energía y usos, en pleno desarrollo.

Centro EDUCATIVO FyA

El taller tiene diez encuentros de tres módulos horarios cada uno (una hora veinte minutos aproximadamente) con la participación de los estudiantes del 4to año de secundario (50 estudiantes como asistencia máxima y un promedio de 32 asistentes). Las actividades y experiencias son graduales, de forma que los estudiantes accedan a los temas a través de tres formas abordajes que se van entrelazando: 1) explicaciones magistrales con participación de los estudiantes a partir de preguntas, 2) trabajo experimental y 3) manejo de simuladores para contrastar hipótesis y resultados; los dos últimos con activa participación de los estudiantes. Esta secuencia metodológica favoreció que los estudiantes manifestaran dudas, necesidades e inquietudes en forma creciente y confiada.

El multiambiente de aprendizaje se concreta en el laboratorio / aula, en la sala de computación del Colegio – muy bien equipada y a disposición del curso - y en el patio.

Los temas desarrollados fueron:

- La luz, lentes, el banco óptico, el microscopio.
- La estática y la dinámica básica de fluidos. La presión atmosférica y la presión en un fluido. El efecto invernadero.
- La energía como concepto transfenomenológico, el ahorro de energía, energía y potencia.

Se hace uso del lenguaje propio de la física desde el principio, así como de gráficos explicativos, de diagramas, de expresiones matemáticas para introducir de lleno al estudiante al “mundo de la física”. Los temas se conectan frecuentemente con aplicaciones cotidianas para mantener el interés y una conexión con la tecnología que se ha desarrollado con base en la física (uso de láseres, celulares, lentes, la presión atmosférica, el cambio climático).

Se utilizan diapositivas elaboradas ad - hoc, en relación a los distintos temas presentados (hidrostática, hidrodinámica, energía, óptica), que contenían teoría, imágenes ejemplificadoras, algunas de las fórmulas a utilizar, aplicaciones tecnológicas de ese mismo conocimiento en la actualidad.

Como logros de interés pueden mencionarse: construcción del microscopio de bajo costo, la medida de su aumento, el uso de los simuladores PhET (Physics Education Technology) como herramienta de especulación, ejercicio y medida de datos y/o resultados (óptica e hidrodinámica), desarrollo y despeje deductivo en el pizarrón de variables físicas para el caso de la velocidad de salida del fluido de la botella.

Las simulaciones son de gran utilidad y atractivo (Universidad de Colorado Boulder, 2018). Facilitan ejercitaciones y pruebas que llevan a los estudiantes a profundizar conceptos y experimentar con las variables sin que se necesiten dispositivos experimentales, además los motiva a participar (Figura 5). Las utilizadas son:

- Energy Skate Park-basics: iniciando la parte de energía
- Pista de Patinar-“Energía”: para continuar con los anterior
- Densidad: para tratar sobre las constantes de los materiales, y las variables
- Flotabilidad: para relacionar las variables aprendidas y su interacción con un fluido
- Presión del fluido y flujo.
- Under Pressure: para reforzar lo anterior
- Geometrics-optics: para trabajar con diversos elementos que producen cambios en la dirección de la luz
- Color Vision: para entender la formación de la luz, su composición.
- Molécula y luz: para trabajar el efecto invernadero.

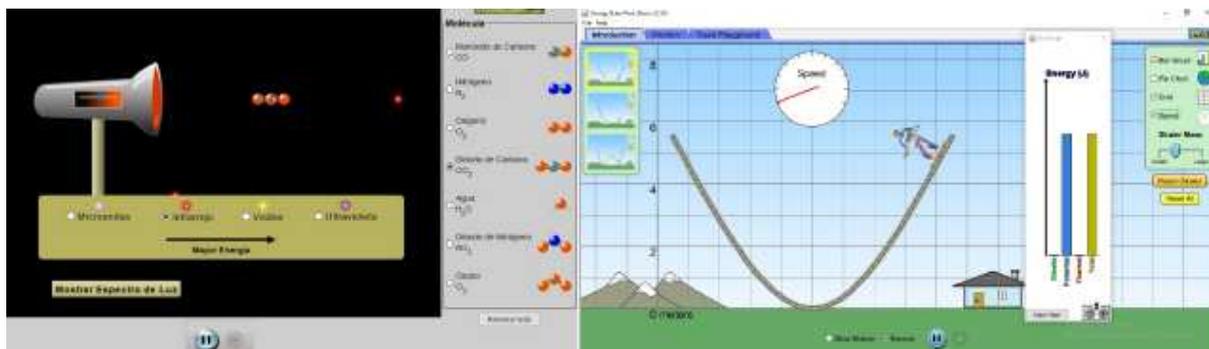


Figura 5: Capturas de pantallas de dos de los simuladores utilizados en el tema energía y efecto invernadero.

Además de estas herramientas, se realizaron varios experimentos, que los alumnos trabajaron en grupo:

1. Se fabricó un pequeño microscopio con materiales de bajo costo y un celular, con el que los estudiantes lograron apreciar diferentes elementos, como hojas o insectos (Figura 5).
2. Se realizó la medición del alcance de un chorro de agua saliente de una botella
3. Se midió (indirectamente) el índice de refracción de una pieza de acrílico
4. Se midió (indirectamente) la distancia focal de una lente convergente.
5. Se analizó y discutió una boleta de luz aportada por los alumnos.



Figura 6: Microscopio de bajo costo construido en el taller de física y medición de su aumento.

Opiniones de los protagonistas

Desde los centros educativos siempre se ha transmitido un mensaje de bienvenida a las acciones de EduMAyE. Son numerosos los docentes que creen de importancia la temática tratada y que entiende que existe una deficiencia educativa en este ámbito. Además, los centros educativos han mostrado siempre agradecimiento “por llegar a ellos”, existe una queja generalizada del “olvido de las instituciones rurales de difícil acceso” y, por tanto, del alumnado rural disperso.

Desde los consejos comunitarios (de cada una de las poblaciones) se ha mostrado agradecimiento, pero con prudencia. Debido al contexto histórico del lugar de trabajo, existe un cierto recelo hacia las acciones que vienen de “afuera”. No obstante, al tratarse de talleres para todos y consultados previamente, los integrantes del proyecto y las temáticas son conocidos y aceptados rápidamente.

Cabe destacar la respuesta de los alumnos de primaria y secundaria. La predisposición de los mismos es destacable, sobre todo en los niveles iniciales los alumnos son muy proactivos y están motivados. En los niveles secundarios la tarea motivadora es más complicada, pero ha mejorado notablemente. No obstante, el panorama positivo que se da en EduMAyE-2 es fruto de los trabajos previos de EduMAyE. El trato con el alumnado, el conocimiento de los caracteres de los grados y la mejora de las metodologías se notan de manera significativa. Así, por ejemplo, los alumnos de secundario de Angosto de Paraná reciben los talleres con entusiasmo y preguntando cuándo será la vuelta. En Río Blanquito los alumnos de primaria preguntan “cuándo toca en su clase el taller y cuándo se repite”.

Sobre la capacitación en el Centro Educativo FyA del barrio Solidaridad, expresan cuatro estudiantes:

- CCLL
“Desde que comenzó el taller me pareció un poco aburrido pero después de algunas clases me gustó. Los profesores te explicaban, te preguntaban si entendíamos, se acercaba, te explicaba de nuevo. Las actividades que nos daban estaban buenas ... lo que me gusto fue cuando teníamos que armar un microscopio, el profe trajo los materiales para que construyamos, me costó.”
- YYVV
“Cuando dijeron que había un taller de física y que teníamos que venir si o si dije que estaba bueno me gustan algunos temas de la física pero otros no. Vine la primer clase y no sabía de qué estaban hablando como que no era para mí porque era medio tedioso, luego de la segunda clase o tercera quizás no me acuerdo me empezó a gustar porque no era todo teoría sino que era práctica acompañando a la teoría y le di más importancia vi que había algo importante, atrayente como así decirlo. Pero bueno estaban buenas las clases de física sobre todo las últimas.”
- CCSS
“Queridos profesores:

Para comenzar la clase me pareció muy buena aprendí muchas cosas nuevas como ser fórmulas, conceptos, y muchísimas cosas más que antes no lo sabía. Por lo tanto lo que explican me parece demasiado bueno ya que me podría ayudar más adelante. De todas las clases que tuvimos siempre me fui aprendiendo algo, y hablando de dudas, no las tuve por que en todas las veces que las tenía preguntaba. Simplemente quiero decirles gracias por todo lo que me enseñaron y por las sonrisas que en algunas ocasiones me supieron sacar.”

– JJFF

“Para mí me pareció re bien y me gusto aprender más.. Espero que vengan para el otro año así para aprender más de ustedes... Los tema que me gusto más es de la luz me copo ja .. Opinión: lo mejor, la explicación “

CONCLUSIONES

La ciencia, como construcción humana de siglos es la responsable de muchos de los logros y los avances tecnológicos actuales. Pero ofrece también un conjunto de valores, técnicas y modos de abordaje que la transforman en un bien cultural. Reiterar prácticas mecanicistas, sin considerar al estudiante actual, es despojarlo de este bien. Por el contrario, intentar abordajes orientados a que los estudiantes la comprendan desde temáticas cotidianas o actuales, con metodologías que lo motiven y lo lleven a poner en juego capacidades nuevas es favorecer la apropiación de técnicas, conceptos, procedimientos y saberes propios de esa ciencia. El uso de simuladores, de experiencias sencillas y de herramientas TICs atrae al estudiante y lo acompaña en alcanzar nuevos logros. Este tipo de abordaje, aplicado a la enseñanza y el aprendizaje de las ER va probando su valía, renueva herramientas y fortalece al equipo docente. Se impulsa así, la réplica de capacitaciones similares, siempre con la debida adecuación al contexto y se va innovando tanto en la práctica como en la construcción del marco teórico. Por cierto, justamente este es uno de los pilares de los logros alcanzados.

Ambas iniciativas buscan y logran que los jóvenes y adultos disfrutaren haciendo ciencia, analizando sus preguntas y curiosidades, develando algunos de sus interrogantes con explicaciones científicas. Aún más, que puedan incorporar gradualmente los beneficios de una formación científica en su vida cotidiana, brindándoles habilidades directamente aplicables, pero también valores como ciudadanos responsables, críticos y creativos, entre ellos: la importancia del trabajo cooperativo, del comportamiento flexible y responsable, del cuidado del ambiente y de la formación permanente. El uso de herramientas TICs se valida y muestra un camino provisorio, aun para la educación formal. Esta es una línea de trabajo para los docentes que debieran profundizar en elaborar, adoptar y desarrollar nuevos formatos y recursos que sostengan la acreditación de los saberes. Se valida también la combinación de temáticas referidas a las ER y al cuidado del medio ambiente como motivadoras.

Para el caso del proyecto EduMAyE2, hacer pie en la U.N.Sa facilitó la concreción de las etapas B y C así como la movilidad a los pueblos. Estas comunidades permaneces aisladas en época de lluvias e incluso el traslado es problemático por las crecientes del Río Blanco y sus afluentes.

Los jóvenes estudiantes universitarios salteños talleristas tienen oportunidad de volcar sus conocimientos en los talleres, en lo procedimental y conceptual. Por ejemplo, en la preparación de dispositivos específicos de aprendizaje (materiales y/o audiovisuales ad-hoc). Pero principalmente aportarán un ida y vuelta en lo actitudinal ya que podrán aplicar conocimientos técnico – científicos actuales en la comunidad kolla y, al mismo tiempo hacer visibles las dificultades de inserción de miembros de esa comunidad en la universidad.

En los talleres EduMAyE realizados, los centros educativos juegan un papel clave debido a que son quienes ceden su tiempo para realizar las actividades del proyecto. Se ha de destacar la predisposición de sus docentes y directivos quienes facilitan el acceso de manera muy significativa. Los representantes comunitarios y los agentes sanitarios son también pilares fundamentales. El contacto y la coordinación con estos actores sociales es esencial para establecer los tiempos de estancia en cada población, la zona de pernoctación y los lugares y horarios para la realización de talleres. Además, es interesante destacar que, aunque en muchas ocasiones los estudiantes sorprenden a los integrantes del

proyecto por su resolución y conocimiento, es palpable cuando en la acción misma hacen suyo los nuevos aprendizajes. En San Andrés, por ejemplo, existe una construcción hecha con botellas pet como réplica a talleres realizados en el marco de EduMayE. Finalmente, es notorio el impacto de la integración de estudiantes europeos, fundadores de EduMayE con los estudiantes salteños, los universitarios y los originarios, aprendiendo a organizar y diseñar, a participar y compartir y a conocerse unos a otros a partir del abordaje de temáticas que afectan global y localmente.

REFERENCIAS

- Brito Leão, Marcelo. (2004). Multiambientes de Entornos Semipresenciales. REVISTA PIXEL-BIT. NÚMERO 23. file:///D:/Meus%20documentos/PósDoc/ArtigosMarcelo/Blended%20Learning.htm (3 of 5)24/07/2006 14:30:02
- Capuano V. y Ríos M (2016). La educación formal y el uso racional de la energía. Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, pp. 10.07-10.16, 2016. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Chaile. M. O. (2007). Proyecto PICTO. "Consolidación de una Red Multidisciplinar de Enseñanza de las Ciencias para profundizar el desarrollo, la aplicación y el seguimiento de materiales innovadores, en los niveles EGB3/Polimodal, superior universitario y en la educación no formal, buscando la mejora de la enseñanza". ANPCYT – UNSa.
- Cohen L. y Manion L. (1990). Métodos de investigación educativa. La Muralla S.A., Madrid, España. ISBN: 84-7133-565-4.
- de las energías renovables desde el paradigma crítico. ISBN: 978-84-86913-14-4.
- Javi V. (2013). Efectividad del uso de las TICs en la promoción y formación en energías renovables. Tesis Doctoral. Biblioteca de la Facultad de Ciencias Exactas. http://bibexa.unsa.edu.ar/bibexa_sistem/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=2708&from=search
- Javi V., Chaile M y Franco J. (2018). Tesis doctoral sobre promoción y formación en energía solar con uso de TICs en Salta, Argentina: innovación e interdisciplina que abren paso a la enseñanza
- Lemke J L. (1998). Teaching all the languages of science: words, symbols, images and actions. School of Education, Brooklyn College. City University of New York. <http://academic.brooklyn.cuny.edu/education/jlemke/papers/barcelon.htm>
- Lemke J. L. (1997). Aprender a hablar ciencia. Lenguaje, aprendizaje y valores. Paidós. Temas de educación. Barcelona. España. ISBN 84-493-0320-6.
- Romero Ariza M. y Quesada A. (2014). Nuevas tecnologías y aprendizaje significativo de las ciencias. Enseñanza de las Ciencias, 32 (1), pp. 101-115. <http://dx.doi.org/10.5565/rev/ensciencias.433>. ISSN (digital): 2174-6486.
- Stone Wiske M (2005). Enseñar para la comprensión. Vinculación entre la investigación y la práctica. ISBN 950-12-5501-8. Editorial Paidós. Buenos Aires, Argentina.
- Universidad de Colorado Boulder. (2018). PhET interactive simulations. <https://phet.colorado.edu/es/simulations/translated/es>

ABSTRACT

Two educational actions framed by the same energy education in context approach are presented: four workshops per age range for four populations of the Tinkunaku Kolla Community of the Department of Orán, province of Salta and a training on basic physics at the FyA Educational Center in the periphery of Salta Capital. Constructivism and action education operate as container frameworks of a theoretical matrix enriched with new approaches: teaching for understanding, collaborative work and multi-ambient learning, among others. Environmental themes, the use and saving of energy together with renewable energies contribute to the motivation of the students; Simulations and other ICT tools appear as supporting tools, along with playful and contextual aspects. The 16 workshops developed and the training offered validate innovative educational formats and achieve acceptance among students, members of the communities and authorities of the schools / colleges.

Keywords: energy education in context, renewable energies, environment, ICT use.

SISTEMA DE INFORMACIÓN SOLAR (SISol). APORTES A LA IMPLEMENTACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE ENERGÍAS RENOVABLES EN SALTA

Sarmiento N.M.*, Franco A.J.*, Belmonte S.* Gisela Gallucci#

* Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Av. Bolivia 5150, Salta, 4400, Salta, Argentina

#Secretaría de Energía de la Provincia de Salta
nilsa@ututo.org, francojudita@yahoo.com.ar, silvina_belmonte@yahoo.com.ar

Recibido 10/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: Presentamos el desarrollo de una herramienta web que permite consultar información y realizar cálculos básicos para la implementación de sistemas de energía solar en la provincia de Salta. Surge de la interacción entre el sector académico-científico (grupo Planificación Energética y Gestión Territorial del Instituto de Investigación en Energías No Convencionales) y el sector gubernamental a nivel provincial (Secretaría de Energía de Salta). Fue realizado en un entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica) mediante la utilización de metodologías ágiles de desarrollo de software. El Sistema de Información Solar (SISol) generado cuenta con cinco módulos. Dos de ellos de consulta geoespacial de radiación solar y temperatura, otros dos de análisis técnico y financiero para la instalación de sistemas fotovoltaicos y de colectores solares para agua caliente. El último con la documentación de respaldo. Será un facilitador al acceso a la información y la toma de decisiones en el ámbito público y privado.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Sistema de Información Solar, Salta, Sistema Soporte a la Decisión.

INTRODUCCION

El sistema energético de un país puede considerarse como un factor estratégico para potenciar su crecimiento económico y viabilizar su desarrollo social. La posibilidad de incrementar la oferta energética basada en fuentes renovables, contribuye además en lo productivo y en lo ambiental, resultando un insumo decisivo en el proceso de producción y asegurando un bajo impacto en el medio ambiente.

Las Energías Renovables han cobrado gran relevancia durante la última década en nuestro país, prueba de ello son los importantes avances en materia legislativa a nivel nacional y provincial. En el plano nacional se promulgó la Ley 27.191(modificación de la Ley 26.190 – decreto reglamentario 531/2.016) que tiene como meta que la contribución de fuentes de energías renovables sea 8% de la matriz eléctrica nacional, para el 2018 y el 20 % el 2025.

La extensión y variedad de climas y biomas de Argentina hacen que en el país exista un enorme potencial para la generación de energía eléctrica y térmica basada en diversas fuentes renovables. En particular la Provincia de Salta, ubicada en la región noroeste, cuenta con recursos importantes de energía solar, biomasa, geotérmica y mini-hidráulica. Salta presenta la Ley N° 7823 ‘Régimen de fomento para las Energías Renovables’, la Ley N° 7824 ‘Balance Neto. Generadores residenciales, industriales y/o productivos’, Ley N° 8086 “Promoción y Estabilidad fiscal para la generación de empleo”, la cual establece el Régimen de Promoción de la Generación de Energías Renovables y el Plan Provincial de Energías Renovables. Ambas leyes fueron promulgadas en 2014 y a principios de 2015 se realizó su reglamentación. El Plan Provincial fue formulado en el periodo 2013-2014 por la

Secretaría de Energía con la participación de instituciones públicas provinciales y nacionales, y el aporte del sector privado.

El objetivo general del Plan es “fomentar la generación y el uso de las energías renovables, a fin de satisfacer y diversificar los requerimientos energéticos de los habitantes de la provincia”, busca promocionar la utilización de energías no convencionales para mejorar la competitividad industrial y la calidad de vida en Salta (Belmonte et al., 2015).

Para el cumplimiento de la reglamentación tanto a nivel nacional como provincial es estratégico el aprovechamiento y uso de los recursos naturales de la zona. La importancia del recurso solar en el país y particularmente en el noroeste argentino ha sido remarcada por investigadores a nivel internacional (Ramírez Camargo et al., 2016), por lo que fomentar y contribuir en proyectos solares en la provincia de Salta, ofrece un camino para garantizar la concreción de los objetivos planteados en la legislación.

Vinculación Inter-actoral:

La investigación sobre energías renovables (ER) en la Argentina tiene una trayectoria de 40 años. A lo largo de estas décadas, las investigaciones se concentraron principalmente en parámetros e indicadores de eficiencia energética, diseño y construcción de sistemas energéticos, medición y evaluación de consumo energético, comportamiento de los sistemas, distribución de los recursos energéticos, costos y perspectivas de desarrollo, construcciones bioclimáticas. Uno de los principales indicadores del desarrollo de este campo en nuestro país es la realización de manera ininterrumpida del congreso ASADES todos los años desde 1974. Sin embargo, esta rica trayectoria no siempre logró traducirse con éxito en la incorporación del conocimiento generado y acumulado en términos de implementación de políticas públicas o adopción de ER por parte de la población.

Frente a esta situación, desde el ámbito científico-académico (Grupo de Planificación Energética y Gestión Territorial) perteneciente al Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), se planteó la necesidad de generar espacios colaborativos que permitieran vincular los diferentes sectores interesados en la implementación de las recientes políticas públicas provinciales. Dichos espacios se tradujeron en la concreción de talleres participativos, proyectos de intercambio, reuniones para el diálogo interinstitucional y realización de una encuesta sobre Energías Renovables en Salta. Los resultados obtenidos demostraron una fuerte cohesión interna en cuanto al pensamiento de los diferentes grupos de actores locales y evidencia un conjunto de aspectos clave (positivos y negativos) que deben tenerse en cuenta para el fomento de las energías renovables en Salta. Estos refieren principalmente al conocimiento del marco legal-regulatorio, el acceso a la información, la valoración de las fuentes renovables y tecnologías disponibles, la articulación entre actores y la rentabilidad económica.

El Grupo de Planificación Energética y Gestión Territorial (PEyGET) y la Secretaría de Energía de Salta (SE) firmaron un convenio de colaboración bilateral. En el marco de dicho convenio se construye un sistema para la toma de decisiones, que propone ser un instrumento para potenciar los aspectos positivos y mitigar los negativos. Esta herramienta se tradujo en una aplicación web: Sistema de Información Solar (SISol) – Salta, que permite el acceso a información técnica de conceptos claves, tales como: cantidad de irradiación solar que se recibe en un determinado periodo de tiempo (día-mes-año) en un determinado lugar, cantidad de energía que produce una instalación fotovoltaica y cuanta energía se puede ahorrar utilizando colectores solares de agua.

Este documento presenta el camino recorrido desde la perspectiva de investigación-acción, integrando las visiones de los diversos grupos de actores sociales vinculados con la Energía Solar. SISol se presenta como una herramienta de integración entre “Gobierno - Ciencia y Tecnología - Sociedad”, nacida de un proceso de alianzas estratégicas y dedicadas al fomento para la implementación de las políticas analizadas.

MATERIALES y METODOS

Proceso de colaboración:

La metodología propuesta para abordar el proceso de colaboración se sustenta en la posibilidad de construir acuerdos y promover modelos de gobernanza horizontales entre actores políticos y sociales. El concepto ‘construcción de la viabilidad’ (Belmonte, 2015) refiere a la posibilidad de que el capital social necesario para el diseño y la implementación de nuevas políticas y acciones, se genere localmente (OLADE/CEPAL/GTZ, 2000). El capital social puede ser definido como el conjunto de valores, actitudes, instituciones, que generan la cohesión social, la solidaridad y la cooperación entre las personas a través de actuaciones y recursos colectivos, incluyendo relaciones de confianza y credibilidad, reciprocidad y sentido de pertenencia (Belmonte, 2015).

Desde 2012 se trabaja conjuntamente entre PEyGET y la SE en diversas actividades resultando de importancia para las instituciones públicas, poder formalizar mediante convenios las acciones que se llevan a cabo conjuntamente. El primer convenio de carácter general tuvo por objeto participar de manera activa en la realización de un sistema de soporte para la toma de decisiones en energías renovables. El segundo convenio de carácter específico permite la realización del sistema SISol, determinando las responsabilidades de cada uno de los actores que participan de la creación y ejecución del sistema.

Definición y construcción teórica de los módulos implementados

A continuación se describen en forma general los métodos utilizados para la implementación de los módulos que integran el sistema SISol. Para el caso de las aplicaciones de energía solar fotovoltaica y térmica se profundiza en los algoritmos utilizados para el cálculo.

a- Módulo de Irradiación Solar

Los mapas de radiación solar se desarrollan a partir del procesamiento de datos satelitales de la red Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LSA SAF), con una resolución espacial aproximada de 16 km². Los datos satelitales se validan y ajustan a partir de comparaciones con mediciones reales de estaciones meteorológicas disponibles para el NOA y estimaciones por métodos matemáticos de radiación de día claro aplicadas en estaciones virtuales.

Las capas temáticas de irradiación solar se integraron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) en el software libre QGIS. El SIG incluyó un mapa base con límites departamentales, variables topográficas (modelo digital de elevación, pendientes y orientación), red hidrográfica, infraestructura vial y localidades principales. Para una lectura detallada del desarrollo del presente módulo, se sugiere la lectura del artículo de Sarmiento et al. 2019.

b- Módulo de Temperatura

A partir del atlas climático de Bianchi et Cravero, 2010 se recortaron para la provincia de Salta: los doce mapas de temperatura media mensual y el mapa de temperatura media anual. A dichos trece mapas se los incluyeron en el proyecto QGIS, y se los exportó en formato raster para su inclusión en el servidor geoespacial, que posibilita la visibilidad y la consulta de los mapas en la aplicación web.

c- Módulo de Instalaciones Fotovoltaicas

El objetivo del presente módulo es proveer una herramienta de pre-diseño para una instalación fotovoltaica en el hogar, otorgando tanto información técnica como cálculos del ahorro económico que puede realizarse a partir de dicha instalación. La gran ventaja son las pocas variables de entrada que se piden para el cálculo. A su vez, este módulo fue validado con distintas herramientas de diseño de instalaciones, como PVSyst (<http://www.pvsyst.com>) y Pvsol (www.valentin-software.com/es/productos/pvsol), obteniendo resultados en el mismo orden de magnitud.

Para la determinación de la energía mensual inyectada a la red por un sistema de paneles fotovoltaicos, se utilizó el concepto de coeficiente de performance PR . El mismo se encuentra definido en la norma UNE-IEC 61724 (IEC Standard 61724, 1998), estándar europeo donde se describen las recomendaciones generales para el análisis del comportamiento eléctrico de los fotovoltaicos. La ecuación (1) detalla el cálculo del PR :

$$PR = \frac{E_{AC}}{\frac{H_m(\alpha, \beta) * P_{GF}}{G}} \quad (1)$$

$H_m(\alpha, \beta)$ = irradiación mensual, incidente en el plano del generador medida en kWh/m², α ángulo azimutal del panel, β ángulo de inclinación sobre la horizontal.

Se considera que el generador siempre se instalará en dirección al Norte, es decir que el ángulo α es fijo en 0°. Mientras que el ángulo β es introducido por el usuario.

P_{GF} = es la potencia máxima del generador fotovoltaico en kWp. La misma es indicada por el usuario. G^* = es la irradiancia de referencia: 1 kW/m².

$H_m(\alpha, \beta)$ se obtiene a partir de los datos del mapeo de irradiación solar global sobre plano horizontal calculando los valores sobre superficie inclinada según lo descrito en Duffie and Beckman 1.991.

Para determinar el PR , se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- 1- Eficiencia de paneles: Se tomó una eficiencia fija del 86%,
- 2- Pérdida del inversor: Se definió una pérdida fija del inversor de 3%,
- 3- Pérdida por variación de Temperatura: para el coeficiente de variación por temperatura se definieron tres zonas de acuerdo a la variación climática de la provincia. Las zonas descriptas son: la región de altitud, la región de valle y la región de planicie. Utilizando el modelo de temperatura de Sandia (King et al., 2004) para calcular la temperatura de la celda fotovoltaica (T_c), la cual depende de la temperatura del panel (T_p). La temperatura de la celda y del panel son calculadas en función de la radiación incidente (I_{poa}), la temperatura ambiente (T_a), la velocidad del viento (V), y las condiciones de ventilación de la instalación, que varía si el panel está instalado sobre una superficie, como un techo o pared, o sobre una estructura aislada, que permite una mejor ventilación del panel.

d- *Módulo de Colectores solares para agua caliente*

El módulo de calefones solares utiliza el método de F-chart para determinar la proporción de ahorro energético que se puede lograr con energía solar. Para este módulo se realizaron algunas simplificaciones, ya que debido a la diversidad de modelos de calefones solares, un cálculo detallado con cada uno es una tarea demasiado compleja.

En Argentina, hasta la fecha no se cuenta con una entidad que certifique (control de calidad) los colectores solares para agua sanitaria, por lo que los calefones solares de agua caliente sanitaria no tienen una norma en la que figure sus eficiencias y características técnicas.

Ante esto, propusimos utilizar dos tipos de calefones en el algoritmo de cálculo: colectores de tubo evacuado, y colectores planos. De bibliografía se tomaron los coeficientes U_r y F_R que requiere el F-chart. Para el cálculo de consumo de agua se utilizaron los estándares de 40 litros por persona a una temperatura de despacho de 60 °C. El cálculo de la temperatura de ingreso del agua se realizó tomando la temperatura de suelo a 2 m de profundidad. Esta temperatura de suelo está correlacionada con la temperatura ambiente media mensual. Las opciones se mancomunaron en todo momento con los funcionarios de la SE, quienes además están promoviendo el uso de estos calefones solares.

Se agregó en este módulo la posibilidad de cálculo de ahorro de energía que se logra con la instalación de un calefón solar, y una estimación del tiempo de recupero de la inversión del equipo, calculada en función del ahorro de la energía convencional no utilizada.

e- *Módulo de Documentación*

Todos los pasos del proceso de desarrollo así como las decisiones técnicas para los cálculos, se fueron registrando en forma simultánea a la construcción de cada módulo y la aplicación web general. La documentación generada junto a otros trabajos previos, de base y publicaciones científicas se subieron al sistema en formato descargable para el usuario.

f- *Metodología ágil de desarrollo de Software*

La aplicación fue desarrollada utilizando la metodología ágil de desarrollo de software: Crystal Clear, de la familia de metodologías Crystal creadas por Alistair Cockburn (Cockburn, 2017).

El grupo de desarrollo, es un grupo de investigación consolidado con un nivel de organización estable enmarcado dentro de un Instituto de Investigación, pero con moderada experiencia en el desarrollo de software. Para el desarrollo de SISol se adoptó esta metodología por las características del grupo de desarrollo: 5 personas y el programa objetivo de desarrollo no crítico: herramienta web libre para el soporte a la decisión de instalación de equipos solares (paneles fotovoltaicos y calefones solares).

Tal como lo sugiere el autor de la metodología se tuvieron en cuenta las siguientes propiedades:

- *Comunicación Osmótica:* Significa que la información fluye en el entorno. Cuando la comunicación en el lugar de trabajo es osmótica, las preguntas y respuestas fluyen naturalmente sin mayores perturbaciones al equipo. El grupo de desarrollo se ubica espacialmente en dos oficinas continuas una al lado de la otra y se caracteriza por el dialogo constante, donde la información circula por todos los participantes. Además del espacio físico, se cuenta con una lista de mail en común y un grupo de WhatsApp lo que permite guardar registros de la información y la garantía de estar todos actualizados en un cierto nivel.
- *Mejoría Reflectante:* Las personas, la tecnología y las responsabilidades pueden cambiar durante el curso de un proyecto, por lo que las convenciones que el equipo utiliza para encarar el proyecto necesitan ser modificadas para poder amoldarse a tales cambios. Las reuniones del grupo de desarrollo de SISol fueron semanales y en las mismas se presentaban el avance del software, lo que permitía la corrección temprana de errores de diseño de software o bien del método empleado para el cálculo de la estimación. Compartir el mismo espacio y tiempo de desarrollo entre los integrantes del grupo de trabajo permitía la adecuación permanente de la metodología de trabajo maximizando la producción en el tiempo disponible.

El equipo de desarrollo de SISol, estuvo conformado por cinco personas: una programadora web, analista programadora, una diseñadora web, investigadora a cargo del proyecto e investigadora directora del grupo de investigación. En la Tabla 1 se puede observar las personas que asumieron los distintos roles definidos en Crystal Clear (Cockburn, 2004).

Rol Crystal Clear	Asumido por:	Características
Patrocinador Ejecutivo (Executive Sponsor)	Director del grupo de investigación.	Encargado de mantener en mente una visión a largo plazo, equilibrando las prioridades a corto plazo con las entregas subsiguientes y la evolución del equipo de desarrollo y el mantenimiento del sistema
Embajador Usuario (Ambassador User)	Programador: familiarizado con los sistemas privativos de estimación de recursos solares y las necesidades de los emprendimientos solares en la zona.	Esta es la persona que se encuentra familiarizada con los procedimientos operativos y el sistema informático actual. Saber cuál es la manera en que se opera, los atajos son necesario, y qué información debe estar visible en la pantalla
Diseñador Jefe	Investigador a cargo del proyecto	Esta es la persona técnica líder, la que mayor experiencia, capaz de hacer el diseño principal del sistema, diga cuándo el equipo está siguiendo el

		proyecto y cuando se ha salido de él
Diseñador-Programador	Ambos Programadores	Codificar y diseño modular del software

Tabla 2. Roles definidos por la metodología y personas que asumieron dichos roles. Las principales herramientas usadas durante el desarrollo de SISol fueron:

1. *Programación de a pares:* técnica de desarrollo de software ágil donde dos programadores codifican en la misma computadora. Los dos diseñadores-programadores, codificaron SISol de esta manera desde su nacimiento hasta puesta en funcionamiento, se notó el incremento en la productividad y en la calidad del código.

2. *Reuniones Diarias de Parado:* La característica clave que poseen este tipo de encuentros es que deben ser cortos, de ahí la característica “de parado” en el nombre de la técnica. Si bien, las reuniones no eran de parados en este caso y las personas en los encuentros variaban se mantenía diariamente y se respondían las tres preguntas: ¿En qué trabajé ayer?, ¿En qué planeo trabajar hoy?, ¿Qué está entorpeciendo tu camino?

3. *Radiador de Información:* Los radiadores de información pueden ser: papeles, pizarrines, una página web, un semáforo, etc., Se encuentran ubicados en un lugar donde las personas puedan verla mientras trabajan o caminan. En ambas oficinas del grupo de investigación se cuenta con pizarrones de gran tamaño (1.5 m x 1.2 m), en donde se exhibía información sobre el proceso de desarrollo, método empleado para el cálculo de la estimación y/o diagramas de ciclo de software.

A su vez, el software fue testeado cada quince días con personal perteneciente a la Secretaría de Energía del gobierno de la provincia de Salta lo que permitió la detección temprana de errores y la adecuación del programa para el cumplimiento de los requerimientos del software.

RESULTADOS

SISol es una aplicación web desarrollada en lenguaje de programación Perl, utilizando PERL CGI, HTML y JavaScript para el Front - End. Las librerías/framework que utiliza son VueJs, JQuery y Bootstrap. Para la visualización de los mapas de irradiación solar se utiliza la API de Google Map como mapa base y el servidor espacial GEOSERVER. SISol se comunica por el puerto 8080 a la aplicación Geoserver, un servidor de código abierto que permite a los usuarios compartir y editar datos geoespaciales. En la figura 1 se puede observar la interface principal de SISol.

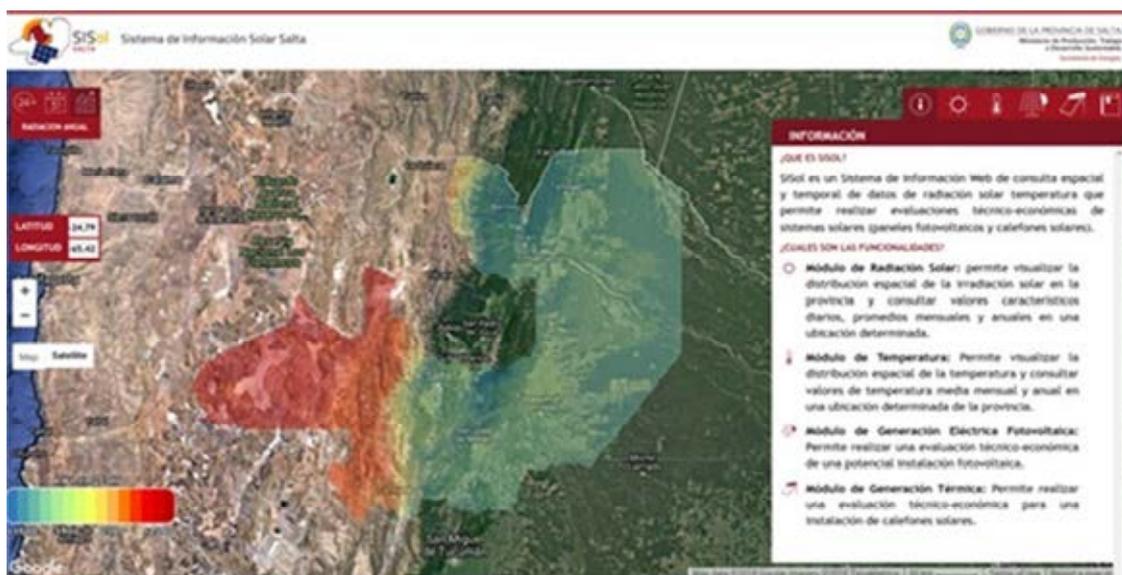


Fig 1. Entorno principal de la aplicación web SISol

En la siguiente tabla se sintetiza cada módulo perteneciente a la aplicación, una breve descripción e imágenes de como varían los cuadros de interfaz.

Módulo	Descripción	Imagen
Irradiación	<p>Se confeccionaron en total 25 mapas de irradiación solar de la provincia de Salta: 12 mapas con irradiación acumulada mensual (uno por cada mes del año), 12 mapas con irradiación día característico (uno por cada mes del año) y un mapa de irradiación anual. Dichos mapas se encuentran en formato raster con el objeto de manipulados con cualquier software SIG (Sistema de Información Geográfica).</p> <p>Una vez realizado esto, dichos mapas fueron subidos en el servidor espacial geoserver para posibilitar su consulta web a través de funciones programadas en lenguaje javascript y perl.</p> <p>Se pueden realizar consultas de datos geográficos (latitud, longitud, altitud) y de irradiación solar diaria, mensual y anual en cualquier punto de la provincia. Así como, la consulta de irradiación solar global sobre plano inclinado (30°), directa sobre plano horizontal y difusa sobre plano horizontal.</p> <p>Este módulo cuenta con tres pestañas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Datos: información de datos geográficos e irradiación solar. 2- Gráficos: se grafica la variación temporal de Enero a Diciembre de la irradiación tanto para el caso de día característico como mensual. 3- Descargas: se permite la descarga de mapas ya editados con capas bases, en formato jpg y pdf. A su vez, la descarga de las capas de irradiación en formato raster. 	

Temperatura	<p>Se obtuvieron a partir de Bianchi y Cravero 2010, 12 mapas de temperatura media mensual y 1 mapa de temperatura media anual. Se cargaron a su vez en el servidor espacial y se desarrollaron funciones para la consulta de datos geográficos y de temperatura media mensual y anual en todos los puntos de la provincia.</p> <p>Este módulo posee, a su vez, tres pestañas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Datos: información de datos geográficos y temperatura media mensual y anual, según la capa seleccionada. 2- Gráficos: se grafica la variación temporal de Enero a Diciembre de la temperatura media mensual, en el punto geográfico seleccionado. 3- Descargas: se permite la descarga de mapas ya editados con capas bases, en formato jpg y pdf. A su vez, la descarga de las capas de temperatura en formato raster. 	 <p>The screenshot shows the 'TEMPERATURA' interface with three tabs: DATOS, GRÁFICOS, and DESCARGAS. Under 'DATOS GEOGRÁFICOS', it displays coordinates: LATITUD: -24.9124, LONGITUD: -65.3961, and ALTITUD: 1301. Below, under 'TEMPERATURA MEDIA ANUAL', there is a bar chart titled 'Temperatura Media (°C)' showing monthly variations from January to December.</p>
Fotovoltaico	<p>Permite realizar una evaluación técnica de una potencial instalación fotovoltaica. El módulo cuenta con dos pestañas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Formulario: pantalla interactiva donde se solicitan datos de la conexión eléctrica en el hogar, el consumo mensual en kWh, características del tipo de instalación fotovoltaica que se desea realizar y si se desea realizar un informe en formato pdf. A su vez, hay un tutorial de uso que puede ser descargado haciendo click en el signo de pregunta. 2- Resultados: se entregan los resultados en un gráfico mixto mensual, una tabla de los datos graficados y en caso de quererlo se entrega en formato pdf el reporte con las características de la posible instalación, así como un informe técnico y financiero en caso de aplicar la ley de fomento. 	 <p>The screenshot shows the 'GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA' interface with two tabs: FORMULARIO and RESULTADOS. Under 'RESULTADOS', it displays a table for 'CONSUMO MENSUAL ELÉCTRICO (kWh)' with values for each month: ENE (168), FEB (139), MAR (228), ABR (148), MAY (217), JUN (331), JUL (250), AGO (228), SEP (197), OCT (174), NOV (169), and DIC (142). Below the table, it lists 'CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN' including 'Capacidad a instalar' (5 kW), 'Tipo de Montaje', 'Inclinación (grados °C)' (30 °C), 'Eficiencia del Inversor (porcentaje %)' (98 %), and 'Factor de pérdidas (porcentaje %)' (20 %). A 'CALCULAR' button is visible at the bottom.</p>

Térmico	<p>Permite realizar una evaluación técnica para una potencial instalación de calefón solar.</p> <p>El módulo cuenta con dos pestañas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Formulario: pantalla interactiva donde se solicitan datos del sistema utilizado para agua caliente, las características de la posible instalación a realizar y si se desea realizar un informe en formato pdf. A su vez, hay un tutorial de uso que puede ser descargado haciendo click en el signo de pregunta. 2- Resultados: se entregan los resultados en un gráfico mensual o bimestral, una tabla de los datos graficados, y en caso de haber seleccionado la realización del informe entonces un informe con los datos visualizados en formato pdf, lo que posibilita su descarga. 	 
Documentación	<p>En esta sección se encuentra disponible toda la documentación inherente al proyecto SISol, tanto tutoriales de uso como manual de desarrollo de los módulos previamente descriptos. Los manuales de desarrollo contienen información técnica de modelización y supuestos asumidos para la simulación de la sección de instalación fotovoltaica y térmica. Los tutoriales de uso a su vez pueden descargarse en cada sección.</p> <p>Además, se incluyeron en esta sección las publicaciones nacionales e internacionales realizadas en el marco del proyecto SISol, con el objeto de brindar información al público en general y a la comunidad científica en particular.</p>	

CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado posibilitó un afianzamiento de los vínculos entre la comunidad científica y los organismos de gobierno, a la vez que generó un resultado pertinente y útil para la promoción de la energía solar en el ámbito provincial.

El Sistema de Información Solar de Salta (SISol) constituye una herramienta innovadora en el país y la región que posibilita el acceso a información de base para la estimación de sistemas energéticos solares fotovoltaicos y térmicos. Los módulos fueron desarrollados incorporando un minucioso estudio técnico para el cálculo, aspectos prácticos para el usuario y expectativas comunes del grupo de investigación y de la Secretaría.

Las herramientas de trabajo colaborativo, aplicación en entorno de SIG y metodologías ágiles de diseño programático resultaron adecuadas a los fines de generar la aplicación web. El programa se encuentra actualmente en una fase final de revisión y testeo estimando su puesta en funcionamiento y difusión masiva en el mes de setiembre 2018.

El desarrollo del SISol permitió establecer una plataforma mancomunada de soporte a la decisión, tanto para el ámbito privado como público. Se espera que esta aplicación impacte positivamente en la implementación de las políticas de energías renovables de la provincia.

REFERENCIAS

Belmonte, S.; Escalante K.; Franco J. (2015). *Shaping changes through participatory processes*. Local development and Renewable energy in rural habitats. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 45 (2015) 278–289. ISSN: 1364-0321.

Cockburn A., *Crystal clear a human-powered methodology for small teams*, 2004.

Bianchi A.R., Cravero S.A.C, 2010. ATLAS CLIMÁTICO DIGITAL DE LA REPÚBLICA ARGENTINA. En Sitio web: <https://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina>

King RR, Sinton RA, Swanson RM. *Doped surfaces in one sun, point-contact solar cells*. *Appl. Phys. Lett.* 1989; 54:1460

Thomas C, Wey E., Blanc P., Wald L., Validation of three satellite-derived databases of surface solar radiation using measurements performed at 42 stations in Brazil, *Advances in Science and Research*. 13 (2016) 81–86. doi:10.5194/asr-13-81-2016.

Ramirez Camargo L., Franco J., Sarmiento Barbieri N.M., Belmonte S., Escalante K., Pagany R., Dorner W., Technical, economical and social assessment of photovoltaics in the frame of the net-metering law for the province of Salta, Argentina, *Energies*. 9 (2016) 133.

Carmona F., Orte P.F., Rivas R., Wolfram E., Kruse E., Development and Analysis of a New Solar Radiation Atlas for Argentina from Ground-Based Measurements and ERES_SYN1deg data, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.003>

IEC Standard 61724. (1998). Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis. Geneva, Switzerland. <ftp://ftp.ee.polyu.edu.hk/wclo/61/IEC61724%20PV%20monitoring.pdf> (acceso 10/05/18).

OLADE/CEPAL/GTZ (2000) Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Guía para la formulación de políticas energéticas. Proyecto Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe. Quito. Ecuador.

Ramirez Camargo L., Altamirano M., Belmonte S., Dorner W. Comparación de fuentes satelitales, de re-análisis y métodos estadísticos para el mapeo de la radiación solar en el valle de Lerma (Salta-Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19 (2015), pp. 11.19-11.30.

ABSTRACT: The work presents the development of a web tool that allows consulting information and performing basic calculations for the implementation of solar energy systems in the province of Salta. The application arises from the interaction between the academic-scientific sector (Energy Planning and Territorial Management group of the Research Institute in Unconventional Energies) and the governmental sector at provincial level (Secretariat of Energy of Salta). The program was carried out in a GIS (Geographic Information Systems) environment with agile software development methodologies. The Solar Information System (SISol) generated has five interfaces or modules. The first two allow the geospatial query of solar radiation and temperature. Modules 3 and 4 allow a technical and financial analysis for the installation of photovoltaic systems and solar collectors for hot water. The last interface presents the supporting documentation for the calculations and provides technical and operational details of the program. It is expected that this application will have a positive impact on the implementation of renewable energy policies in the province, facilitating access to information and decision-making in the public and private sectors.

KEYWORDS: Solar Energy, Information Solar System, Decision Support Tool, Salta.

PROPUESTA Y ANÁLISIS DE TARIFAS PARA USUARIOS RESIDENCIALES DEL MERCADO DISPERSO DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA

C. Ramos Caro, A. Iriarte¹, C. Cadena²

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. ramoscarola@yahoo.com

Recibido 14/08/18, aceptado 19/09/18

RESUMEN: El presente trabajo muestra el resumen de la metodología, y su análisis posterior, para la determinación de tipos de tarifa residencial correspondientes a usuarios individuales del mercado disperso de Catamarca. El desarrollo toma como primera alternativa, la instalación en curso de los sistemas fotovoltaicos financiados por el Proyecto de Energías Renovables para Mercados Rurales PERMER. La segunda alternativa, consiste en una propuesta basada en un análisis de la demanda potencial en hogares dispersos de la provincia. En cuanto al método seleccionado, se efectúa en primer lugar una caracterización y cuantificación del mercado disperso provincial. Posteriormente, y a través de estudios anteriores y relevamientos in situ, se establece el cuadro de demanda para las dos categorías propuestas de usuarios residenciales. Se obtiene la tarifa para los futuros usuarios, y se realiza un análisis comparativo de los componentes tarifarios. Se incorpora la inclusión de aspectos sociales vinculados a la capacidad de pago.

Palabras clave: mercado disperso, tarifas, demanda, residenciales, PERMER.

INTRODUCCIÓN

Catamarca presenta en su vasta extensión geográfica, hogares que, por inaccesibilidad o distancia, no pertenecen a la red de energía eléctrica del Sistema Argentino de Interconexión SADI. Estos hogares conforman el mercado disperso. La mayor parte de los hogares del mercado disperso provincial, pertenecen a los departamentos del norte y oeste del territorio. Algunas de las viviendas se encuentran agrupadas, en forma de asentamientos poblacionales. Otras en cambio, se localizan en puestos alejados entre sí. Existe un número importante, principalmente en las zonas cordilleranas, de viviendas a las que solamente se puede acceder a pie o a lomo de mula. También hay habitantes que viven en lugares muy remotos e inhóspitos de la montaña; y casos de pobladores que habitan temporariamente en un lugar, trasladándose a otro sitio durante un período específico del año.

En las últimas décadas, la provincia ha realizado diversas intervenciones para dar solución a la energización de las localidades aisladas. Muchas de estas medidas no fueron sustentables en el tiempo, por no contar con mecanismos financieros y/o de gestión suficientes para la reposición del equipamiento al término de su vida útil. Por otro lado, en la actualidad aún existen parajes y localidades que no recibieron ningún tipo de acción para electrificación, generando así un *mercado disperso insatisfecho*.

En el año 2.004, la provincia firmó por primera vez un Convenio con PERMER (Proyecto de Energías Renovables para Mercados Rurales). Con la adhesión a este programa se pudieron ejecutar las siguientes obras en localidades aisladas: microcentral hidroeléctrica para abastecer la localidad de

¹ Investigador del CONICET

² Personal de Apoyo del CONICET

Laguna Blanca, microcentral hidroeléctrica en la Hostería de Cortaderas, sistemas fotovoltaicos en los refugios cordilleranos, aerogeneradores en puesto de gendarmería de Las Grutas y por último, provisión y montaje de 40 sistemas fotovoltaicos para escuelas. El mantenimiento de estas instalaciones quedó a cargo del Ministerio de Servicios Públicos y del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología, sin cargo alguno para los usuarios, tanto para instalación como manutención. Todas las obras ejecutadas fueron destinadas a instituciones o comunidades.

El Modelo Argentino de electrificación rural, llevado adelante por el programa PERMER, presenta condiciones para la prestación del servicio: firma del Convenio Nación y Provincia, existencia de una Unidad Ejecutora Provincial y de una prestataria del servicio de operación y mantenimiento de las obras financiadas con el programa.

La prestataria del servicio de obras PERMER, determina la sustentabilidad de su servicio a través de la aplicación de tarifas a los usuarios. Siendo la metodología para la determinación del cuadro tarifario correspondiente, plasmada en un acuerdo entre la provincia y prestataria.

El mercado disperso es un mercado desregulado, donde la implementación de tarifas es competencia provincial, y toma aspectos regulatorios básicos, en materia de calidad del servicio y objetivos, de la ley 24.065 Régimen de Energía Eléctrica.

En los meses de marzo y mayo del año 2016, se firma el Convenio Ampliatorio PERMER y el Acuerdo de Prestación del Servicio respectivamente. El servicio de energía eléctrica a los usuarios individuales del mercado disperso, queda a cargo de la empresa Energía Catamarca Sociedad Anónima con Participación Estatal Mayoritaria EC SAPEM.

En el año 2017, a través del Proyecto de Energías Renovables para Mercados Rurales PERMER, la provincia gestionó la adquisición e instalación de 1.077 sistemas fotovoltaicos individuales, destinados a beneficiarios residenciales de localidades aisladas.

En el Estudio tarifario para el Mercado disperso de la provincia de Catamarca (Ramos Caro C., Iriarte A., Cadena C., 2017, Reunión ASADES) se presenta un cuadro tarifario para diferentes categorías de usuarios de sistemas fotovoltaicos individuales, obtenido de la aplicación de una metodología implementada por otras provincias y con la incorporación de parámetros y criterios basados en un estudio exploratorio nacional.

En el presente trabajo se muestra relevamientos y resultados de la demanda de energía eléctrica de los pobladores de puestos dispersos de Catamarca; se incluye además, el análisis individual y conjunto de componentes tarifarios correspondientes a dos alternativas diferentes para la energización de hogares residenciales. Se plantea además la incorporación de tarifas al usuario para viabilizar el pago en pobladores de bajos ingresos.

DATOS Y METODOLOGÍA

El modelo PERMER en usuarios residenciales individuales

El último censo realizado en el país (año 2010) arrojó 2.207 hogares, en la provincia de Catamarca, sin ningún tipo de energía eléctrica. Estas viviendas están distribuidas en diferentes departamentos. También registró 701 hogares con generación propia (a motor o por otros medios).

A partir del Cuestionario Ampliado de la base de datos de REDATAM (procesamiento en línea), se obtuvieron tablas del INDEC Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2.010. La base de datos REDATAM permite obtener cruces de variables y distribuciones de frecuencias, a partir de micro datos censales, en este caso para un análisis provincial y local.

Por otro lado, se realizó un sondeo, con información proveniente de diferentes fuentes provinciales, para determinar con mayor precisión el mercado disperso de la provincia. Esto debido a que el Censo

2010, en lo que respecta a *tenencia de electricidad*, hace referencia a *hogares con red*, y no discrimina si esa red es aislada o pertenece al Sistema Argentino de Interconexión. Dicha cuestión imposibilita cuantificar el mercado disperso provincial de una manera fehaciente.

La localización y distribución geográfica de los pobladores del mercado disperso, son determinantes para la definición de las futuras alternativas tecnológicas para energización; una de estas es la instalación de minirredes con sistemas de generación centralizado, para casos de asentamientos con distancias relativamente cortas entre los hogares, la otra opción es la incorporación de sistemas individuales para hogares o puestos dispersos muy lejanos entre sí.

A principios del año 2017, se comenzó con el montaje de 1077 instalaciones fotovoltaicas destinadas a residenciales (puestos dispersos), distribuidos en toda la provincia (Antofagasta de la Sierra, Andalgalá, Ancasti, Belén, Pomán, Santa María, Tinogasta). La adquisición y posterior montaje fueron contratados por la Unidad Coordinadora Nacional del PERMER en la Licitación Nacional 02/2017. (Ministerio de Servicios Públicos, año 2017)

Metodología, escenarios y equipos

A partir de estudios preexistentes y relevamientos in situ en puestos aislados de la provincia, se identificaron dos tipos de demanda en pobladores residenciales. A cada tipificación se le asignó una categoría y se establecieron las nomenclaturas Tarifa Residencial 1 o TR1 y Tarifa Residencial 2 o TR2.

Para el armado de la estructura tarifaria del mercado disperso en sistemas individuales, fue adoptada como referencia la metodología implementada por la mayor parte de las provincias adheridas al PERMER. Así como los resultados de las encuestas realizadas en el Estudio Tarifario para el Mercado Disperso de la Provincia de Catamarca (Ramos Caro et al., 2017). Se realizaron las modificaciones pertinentes, teniendo en cuenta el estado de situación de la provincia de Catamarca, además de parámetros de partida: tipo y aspectos administrativos de la organización, cantidad de visitas para el mantenimiento, etc.

En la metodología propuesta para el estudio tarifario se definió en primer lugar los costos del sistema fotovoltaico instalado, incluyendo costos de mano de obra, para cada categoría. Para la determinación de cantidades y características del equipamiento fotovoltaico se utilizó el método simplificado, en función de las demandas de cada tipología tarifaria. Posteriormente se procedió a la clasificación y determinación de costos y gastos de la organización prestataria del servicio.

La tarifa está compuesta por dos elementos principales: el precio de la potencia instalada y los costos para la sustentabilidad del sistema propuesto. La determinación del precio de la potencia instalada, se obtuvo de la razón entre la sumatoria de los Costos de Mantenimiento anuales y el Costo del Capital Fotovoltaico, (\$/año), y el valor de Potencia instalada total, en Wp. Los costos del sistema incorporan costos operativos, de comercialización y administrativos (incluidos gastos). El cálculo de la tarifa también contiene impuestos: ingresos brutos y una tasa de fiscalización y control.

Los valores obtenidos corresponden a sueldos y precios dolarizados vigentes al mes de noviembre del año 2017.

Para el cálculo de tarifas residenciales se aplicó la metodología propuesta para los 1.077 hogares dispersos individualizados, considerando dos escenarios posibles:

Escenario 1: Instalaciones destinadas a iluminación, comunicación y entretenimiento (en Corriente Continua). Corresponde al escenario real de implementación y cálculo de la tarifa TR1.

En cuanto a la tecnología del equipamiento de las instalaciones fotovoltaicas adquiridas en la licitación, ver Figura 1, ésta presenta las siguientes características principales (PERMER, año 2016):

- Paneles fotovoltaicos: son del tipo policristalino, con potencia nominal 130 Wp, acorde a Norma IEC 61215.
- Estructura soporte: constituido por un armazón que se instalará sobre un caño galvanizado, en fundación de hormigón armado. El armazón está construido con perfiles de acero galvanizado.
- Baterías: del tipo ácido-plomo regulada por válvula o denominada VRLA, sin mantenimiento. Tensión de trabajo de 12 V en corriente continua; capacidad mínima debe ser 150 Ah en C20.
- Regulador de Carga: Controlado por microprocesador. Tensión nominal de trabajo: 12 Vcc. Corriente Nominal de 15 A.
- Conversor: Tensión nominal de entrada: 12 Vcc. Rango de la tensión de salida: de 3V, 6V, 7,5V, 9 V y 12V para corrientes de consumo de hasta 1A, 1,5A, 1,5A, 1,5A y 1,5A respectivamente.
- Luminarias, instalación interna y protecciones: Lámpara de leds; tensión nominal de trabajo: 12V de corriente continua; potencia mínima 5W; Flujo lumínico mínimo: 70 lm. Conductores de 4 y 2,5 mm² de sección. Cañerías de PVC rígido. Interruptores. Conectores. Puesta a tierra. Etc.
- Interruptor termomagnético: para corriente continua según norma IEC 60947-2 de la corriente nominal especificada por el fabricante.



Figura 1. Fotografía de instalación PERMER en la provincia de Catamarca. Fuente: Ministerio de Servicios Públicos, año 2017

Escenario 2: Instalaciones para comunicación, entretenimiento y conservación de alimentos (en Corriente Alterna), corresponde a la tarifa TR2. En relación a la tecnología asignada para el cálculo, se continúa con los criterios adoptados para la instalación del primer escenario, en cuanto a aspectos generales de las características técnicas de los equipos. Por tratarse de una instalación en corriente alterna incorpora el inversor, en este caso se trata de inversores cargadores de onda senoidal pura, potencias 3000/ 3500 W.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Cuantificación y caracterización del Mercado Disperso provincial

Con la base de datos REDATAM se obtuvo información que permite determinar que los departamentos con mayor *mercado disperso insatisfecho* son Belén, Santa María, Capital y Tinogasta con 490, 394, 248 y 228 hogares respectivamente; en ellos se concentra el 62% del total de hogares sin energía eléctrica de la provincia. Siguen, en orden decreciente, los departamentos La Paz, Andalgalá, Santa Rosa, Antofagasta de la Sierra y El Alto con 164, 123, 108, 72 y 70 hogares. En tanto que, con menor cantidad de hogares sin energía eléctrica se encuentran Pomán, Ancasti, Valle Viejo, Paclín, Ambato y Fray Mamerto Esquiú con 48, 47, 45, 29, 20 y 18. En la Figura 2 se muestra el porcentaje de hogares con energía eléctrica por departamento en relación al total de hogares de la provincia.

Catamarca posee localidades aisladas con diferentes sistemas de generación, y que cuentan con redes de distribución. El departamento Antofagasta de la Sierra en su totalidad, el sector norte de Belén, y localidades de Santa María, poseen redes de media y/o baja tensión que no pertenecen al Sistema Argentino de Interconexión. Por lo tanto, todos los pobladores de estos sectores también pertenecen al mercado disperso provincial.

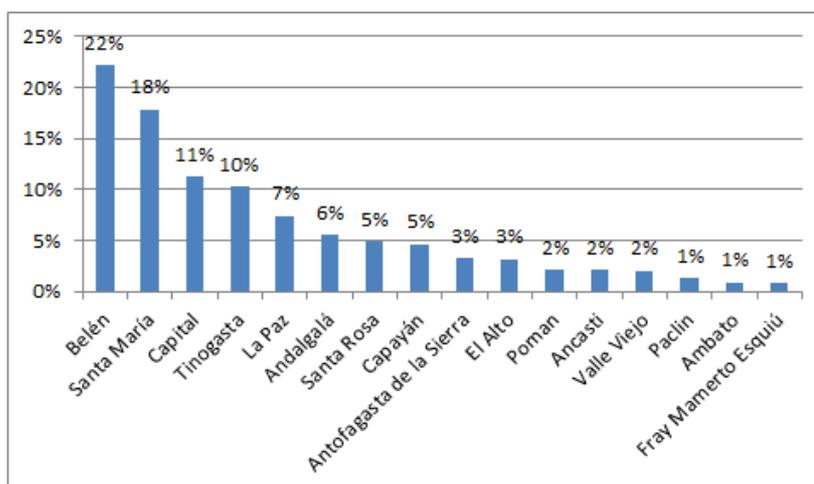


Figura 2. Hogares con tenencia de electricidad – Porcentaje del total provincial.

Fuente: Datos adaptados, de REDATAM (Censo 2010)

A través de datos proporcionados por la distribuidora provincial EC SAPEM y por el Ministerio de Servicios Públicos, es posible inferir la cantidad total de hogares pertenecientes al mercado disperso.

Según datos brindados por la distribuidora, el departamento Antofagasta de la Sierra posee un total de 481 hogares con energía eléctrica proveniente de redes de distribución (con sistemas de generación diesel). En tanto que, en la localidad de Laguna Blanca, perteneciente al norte del departamento Belén, se encuentran 45 hogares conectados a la red de distribución aislada (generación diesel y de una microcentral hidroeléctrica). También en las localidades de La Hoyada y El Cajón, del departamento Santa María, existen 30 y 35 hogares conectados a la red aislada respectivamente (con sistemas de generación diesel). (Ministerio de Servicios Públicos, año 2017)

Por todo lo antes enunciado, el mercado disperso provincial ascendería a 3.499 hogares, del cual el 65% es mercado insatisfecho. Estos valores, sin considerar la obra en ejecución de la Licitación Nacional del PERMER, que incorporaría más de mil nuevos usuarios residenciales.

En los valores estimados, al no poder efectuarse una individualización de hogares, y la distancia entre ellos, no puede determinarse si el mercado disperso insatisfecho se trata de puestos dispersos o asentamientos poblacionales.

Demanda potencial de pobladores residenciales

La provincia cuenta con estudios de mercado y/o demanda previos al presente trabajo, que van a ser de utilidad en el análisis de la demanda potencial de los pobladores del mercado disperso.

El primero a citar es el estudio de mercado contratado por el PERMER (Estudio de factibilidad del abastecimiento eléctrico de la población rural dispersa con energías renovables en la provincia de Catamarca, año 2011), donde revela que, el 26% de la población encuestada usa electricidad mediante generación propia (el 78% de ese total pertenece a usuarios de paneles fotovoltaicos, el resto se reparte en generación diesel u otros medios). El estudio también hace un pequeño detalle de los medios utilizados para iluminación; en este punto adquiere especial relevancia el uso del kerosene (51%), continúan con más del 19% los usuarios de algún medio de generación propio (paneles solares o grupos diesel) y le siguen en orden decreciente el uso de velas (18%), uso combinado de velas, kerosene, etc. (4%), pilas (4%) y gas licuado (4%).

De aquellos usuarios que sí poseen algún medio de generación propio (26% de los casos), el estudio de mercado muestra que la demanda actual promedio arroja un valor de 118 W por usuario residencial. La carga de consumo se reparte en la utilización de luminarias (en el 100% de los casos), el 25% radio/grabador y menos del 5% posee celular, el resto de los electrodomésticos se presentan en valores inferiores al 1%. Cabe resaltar que el uso de determinados electrodomésticos está supeditado a la disponibilidad energética de cada caso.

También en el mismo estudio se analizó la demanda potencial de la población, es decir qué tipo de equipamiento doméstico incorporarían en el término de 2 años (en el caso de contar con la disponibilidad energética suficiente para ello). Los resultados obtenidos mostraron que el promedio de consumo adicional por usuario sería de 469 W, los que sumados a la demanda promedio actual darían un valor de 587 W por usuario. El estudio señaló además que los nuevos electrodomésticos que la población encuestada desearía adicionar son: en primer lugar heladeras, planchas, estufas/ calefones eléctricos, y en segundo lugar televisores y lavarropas.

La segunda fuente de información que se tomó como referencia, es el sondeo de demanda del proyecto de prefactibilidad de un sistema híbrido fotovoltaico en la localidad de La Hoyada, departamento Santa María (año 2009). El estudio consistió en encuestas a los jefes de familia (47) y relevamiento a instituciones (8), donde se analizaron aspectos tales como situación actual de las instalaciones internas, voluntad de pago por el servicio, gasto en productos sustitutos del servicio eléctrico, potencia actual, potencia proyectada, etc. En el período de análisis, la localidad de La Hoyada contaba con el servicio de energía provisto por la generación de un grupo diesel de 133 kVA y un sistema de distribución en baja tensión. Las horas de generación varían según la disponibilidad de combustible. (Ministerio de Obras y Servicios Públicos, año 2009)

El citado estudio arrojó los siguientes resultados:

- Aceptación del sistema híbrido en un 100%
- El promedio de demanda máxima actual es de 730 W por usuario (en función del equipamiento existente en las viviendas e instituciones)
- El promedio de demanda máxima potencial es de 1.537 W por usuario

Y por último, se incorporó para análisis, el estudio de demanda del proyecto de sistema híbrido fotovoltaico para la localidad de El Peñón, departamento Antofagasta de la Sierra. Actualmente el sistema de generación centralizado está compuesto por un equipo generador diesel de 140 kVA, y el sistema de distribución es en baja tensión. La generación es de 7 horas diarias, la que mediante la adición del sistema fotovoltaico será de 24 horas. (Ministerio de Servicios Públicos, año 2016).

El estudio de demanda reveló la siguiente información:

- En período estival la cantidad de usuarios llega a 119.
- El promedio de demanda máxima actual supera los 1.959 W por usuario (calculado sobre el equipamiento existente en viviendas e instituciones)

La energía puesta a disposición al usuario, a través de la instalación, puede satisfacer un determinado consumo diario/mensual. En función de los estudios previos y visitas a beneficiarios se determinó una demanda referencial para cada categoría.

En primer lugar se actualizó la accesibilidad de tecnologías, que al momento de las encuestas y estudios no estaban disponibles en el mercado local, tal es el caso de televisores con pantalla de cristal líquido (LCD) y televisores LED. Posteriormente se agrupó el equipamiento en las categorías Iluminación, Hogar, Entretenimiento, Climatización, Educación y Comunicación, para facilitar la tarea de visualización y distribución de los equipos propuestos. Tal como se detalló anteriormente, el sistema de generación financiado por PERMER correspondientes al Escenario 1, está compuesto por: panel fotovoltaico, regulador y batería. La instalación no posee inversor, por lo tanto no pueden

conectarse equipos que requieran corriente alterna para funcionar. El programa provee junto al sistema de generación, la instalación eléctrica interna e iluminación con lámparas led. Tomando los mencionados criterios del programa, se considera una opción con una demanda futura de iluminación, comunicación (carga de celular) y uso de radio (entretenimiento). Por lo tanto la categoría TR1 podrá satisfacer una carga de consumo de 60 W y 0,29 kWh/día de energía consumida (proyectando las horas de uso de cada equipo). Todos los usos previstos son en corriente continua. En la Tabla 1 se detalla lo antes descripto.

Tipo	Equipamiento	Cant.	Potencia (W)		Energía (kWh/día)	
			Unitaria	Total	Util. (hs)	Total
Vivienda Rural 4 personas	Iluminación					
	Lámpara BC 11 W		11			
	Lámpara Led 5 W	5	5	25	6	0,15
	Entretenimiento					
	Radiograbador/audio	1	30	30	4	0,12
	Televisor LCD		180			
	Televisor LED		40			
	Televisor color de tubo		155			
	Decodificador Antena Satelital		25			
	Comunicación					
	Cargador de celular	1	5	5	3	0,02
	Total			60		0,29

Tabla 1. Cuadro de demanda Vivienda Rural p/4 personas (CC).

Fuente: consumos de artefactos eléctricos de EDENOR, año 2017

En la segunda categoría propuesta para usuarios residenciales, o TR2, se incorporó las categorías: iluminación, comunicación (la carga de un celular), equipamiento del hogar (una heladera), y por último entretenimiento con el uso de radio y televisión (en la que se incluye el decodificador de antena satelital ya que en la mayoría de los casos es la única alternativa). Aunque los estudios exploratorios de demanda mostraron nuevas expectativas de uso en electrodomésticos (lavarropas, planchas, computadora, etc.), no fueron agregados estos equipos adicionales por tratarse ésta una propuesta básica mínima. El total de carga considerado plantea una potencia de consumo de 325 W estimando sus horas de uso, nos entregaría una energía de 2,95 kWh/día. Se muestra la citada propuesta, en la Tabla 2, donde se detallan valores de potencia unitaria por equipamiento, cantidad, y horas de uso.

Tipo	Equipamiento	Cant.	Potencia (W)		Energía (kWh/día)	
			Unitaria	Total	Util. (hs)	Total
Vivienda Rural 4 personas	Iluminación					
	Lámpara BC 11 W		11			
	Lámpara Led 5 W	5	5	25	6	0,15
	Hogar					
	Bomba para agua 1/2 HP		380			
	Plancha		1500			
	Lavarropas Semiautomático		200			
	Heladera	1	200	200	12	2,40
	Freezer		250			
	Entretenimiento					
	Radiograbador/audio	1	30	30	4	0,12
	Televisor LCD		180			
	Televisor LED	1	40	40	4	0,16
	Televisor color de tubo		155			
	Decodificador Antena Satelital	1	25	25	4	0,10
	Comunicación					
	Cargador de celular	1	5	5	3	0,02
	Total			325		2,95

Tabla 2. Cuadro de demanda Vivienda Rural p/4 personas (CA).

Fuente: consumos de artefactos eléctricos de EDENOR, año 2017

En el análisis de la demanda se destaca una particularidad en los pobladores de la Puna. Ésta consiste en la dificultad al acceso de medios para calentar el agua sanitaria y acondicionar el ambiente en bajas temperaturas. La Puna posee clima de temperaturas muy bajas en invierno, y por sus características fitogeográficas es limitada la disponibilidad de leña para calentamiento de agua para bañarse y/o climatizar la vivienda. Por todo esto, ante la disponibilidad de energía eléctrica, el futuro usuario de la Puna recurriría a equipamiento de bajo costo y que satisfaga sus necesidades, ya sea para calentamiento de agua sanitaria o calefaccionar ambientes (calefones o estufas eléctricos de alta potencia de consumo). Desde el punto de vista de la eficiencia energética, tanto los calefones o estufas eléctricos no son recomendables, mucho menos en sistemas de generación individuales. Ante la problemática, se recomienda complementar la necesidad del futuro usuario con equipamiento eficiente (calefones solares, acondicionamiento bioclimático de las viviendas, etc.).

Tarifa plena y final al usuario residencial

A partir de la metodología mencionada anteriormente se obtuvo el resultado de la tarifa residencial TR1, del Escenario 1 o instalación de sistemas financiados actualmente con PERMER. El valor mensual calculado es de \$238,25. Esta tarifa para una energía puesta a disposición por día de 285 Wh/día ó 8.550 Wh/mes y para una potencia instalada de 130 Wp.

Del mismo modo, la tarifa residencial TR2 calculada, arroja un valor mensual de \$1.067,84. Para una energía puesta a disposición por día de 2.945 Wh/día ó 88.350 Wh/mes y una potencia instalada de 1.050 Wp.

Las tarifas calculadas, corresponden a los valores necesarios para la sustentabilidad del sistema, a las que se denominarán *tarifas plenas*. Hasta el momento no se consideró la capacidad de pago de los futuros usuarios de las tarifas obtenidas. Por tratarse de una temática de fundamental importancia para la implementación y pago efectivo por parte de los futuros usuarios, se efectuó el cálculo de las *tarifas finales al cliente*. En éstas se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Resultados obtenidos en el estudio exploratorio, en relación a porcentajes y criterios implementados en otras provincias para subsidios.
- Resultados de estudios de mercado anteriores, sobre la capacidad de pago de los futuros beneficiarios, además del uso de productos sustitutos para la provisión de energía eléctrica.

En los resultados obtenidos de las encuestas realizadas a las provincias (Ramos Caro et al., año 2017), se concluye que: más del 70% de las provincias subsidian sus tarifas, donde el 50% subsidia más del 80% del valor tarifario (el 50% restante subsidia entre el 30% y 80% del valor). El criterio aplicado que prevalece es el del subsidio a la totalidad de la población objeto (más del 60% de los casos encuestados).

Por otro lado el Estudio de factibilidad del abastecimiento eléctrico de la población rural dispersa con energías renovables en la provincia de Catamarca (año 2011), expresa que el grupo familiar de la población rural dispersa gasta en promedio entre un 4% y 14% de sus ingresos por mes para satisfacer sus necesidades energéticas (según el nivel de ingreso al que pertenezca), donde el 25% corresponde a bajos ingresos, el 50% a ingresos medios y el 25% restante al sector altos ingresos. Otro de los resultados obtenidos en el estudio a destacar, son los medios utilizados para satisfacer la demanda energética con fines de iluminación: 52% kerosene, 20% energía eléctrica (solar o moto generador, 19% velas, 5% combina solar con kerosene, velas, motor generador, gas y/o gasoil, 4% gas licuado (valores redondeados). También fueron analizados en las encuestas, aspectos relacionados a la disposición de pago de los futuros beneficiarios: éstos mencionaron estar dispuestos a pagar, el 97% de los casos, una tarifa mensual de hasta \$30 (promedio). Esta última representa el 23% de lo que gasta por mes en productos sustitutos para satisfacer sus necesidades energéticas. En el 85% de los casos prefieren que el pago sea mensual. Cabe destacar que los resultados en el mencionado estudio se obtuvieron valores en pesos, y por aspectos inflacionarios variables resultan poco representativos a la

fecha. Además, la base de la encuesta considera el equipamiento que financia el PERMER con prestaciones para iluminación y comunicación.

Además de los estudios antes citados, la Unidad Coordinadora Nacional del PERMER facilitó datos estadísticos sobre usos de productos sustitutos de la energía eléctrica (por mes) en una familia rural: 5 (cinco) litros de kerosene; 5 (cinco) paquetes de velas grandes (de cuatro unidades por paquete); 10 (diez) pilas grandes (tamaño D). Dichos usos, actualizados al valor de mercado actual arrojan un resultado total de \$690. Estos precios son correspondientes a noviembre del año 2017.

Del análisis de los estudios y datos antes mencionados, resultan las tarifas finales para los clientes residenciales correspondientes a las categorías TR-1 y TR-2. Esta propuesta se basa en los siguientes puntos:

- La provincia no cuenta en la actualidad con un estudio actualizado que permita determinar cuál es el nivel de ingresos de todos los usuarios (individualmente).
- Los estudios disponibles tampoco permiten determinar en qué valores (en pesos), se encuentra comprendida la franja de bajos ingresos de los usuarios.
- Los estudios avalan la disposición de pago.
- Las familias de bajos ingresos gastan un 4% de sus ingresos en productos sustitutos (para satisfacer sus necesidades energéticas de iluminación).
- Más del 70% de las provincias subsidian sus tarifas y el 50% subsidia más del 80% del valor tarifario.
- No se realizaron estudios sobre posibles tarifas para servicios con mayores prestaciones.

Poniendo en relevancia los puntos anteriores, se considera la peor situación correspondiente al sector de bajos ingresos (ingreso único de Asignación Universal por Hijo). Tal monto es de \$1.412, por lo que el 4% representa un valor de \$56,50 aproximadamente. Trasladado dicho monto a la tarifa residencial TR-1, la propuesta consiste en la necesidad de cobertura, por parte del Estado Provincial, del 76,30 % restante de la tarifa. O expresado de otro modo, el usuario pagaría casi un 24% del valor de la tarifa.

En cuanto a la tarifa residencial TR-2, al considerar otro tipo de prestaciones y calculada su demanda para una familia tipo. Se compara con la tarifa de una vivienda rural con electrificación convencional, al acercarse las prestaciones ofrecidas por el servicio en ambos casos. Se propone una tarifa final al usuario de \$165,70 (mensual), por lo que requiere una cobertura del 84,5% por parte del Estado Provincial. Los valores considerados corresponden a los montos vigentes a noviembre del 2017.

En la Figura Tabla3 se muestran las tarifas plenas y finales para usuarios residenciales.

Por Tipo de Equipamiento y Destino p/la Generación	Prestaciones de la Categoría	Energía puesta a Disposición Diaria (Wh/día)	Energía puesta a Disposición Mensual (Wh/mes)	Categoría	Tarifa Plena \$ Cliente – Mes	Tarifa Final \$ Cliente – Mes
Residencial	Iluminación, Comunicación y Entretenimiento en corriente continua	285	8.550	TR-1	\$238,25	\$56,50
Individual	Iluminación, Comunicación, Entretenimiento y Hogar en corriente alterna	2.945	88.350	TR-2	\$1.067,84	\$165,70

Tabla 3. Cuadro Tarifario para Sistemas Individuales

Componentes tarifarios

Una vez efectuado el cálculo para cada una de las categorías, se procedió a un análisis pormenorizado de los costos operativos y administrativos anuales necesarios para el servicio.

En la Tarifa Residencial TR1 se distribuyen de la siguiente forma: “Generación y Distribución” en un 85,03%, “Administración” con un valor de 14,80% y por último un 0,18% en el rubro de “Comercialización”. Los costos de “Generación y distribución” están influenciados fuertemente por la cantidad de veces que se produce la visita de inspección a los sistemas fotovoltaicos para el mantenimiento de los equipos (Ramos Caro C. et al., 2017). De manera análoga al procedimiento anterior, esta vez aplicado a la Tarifa Residencial TR2, los costos y gastos anuales de la prestataria del servicio se presentan de la siguiente manera: “Costos de Generación y Distribución” 95,73%, “Costos (y gastos) de administración” 4,22% y de “Comercialización” un 0,05%. Los valores porcentuales para ambas tarifas se representan en la siguiente Figura 3.

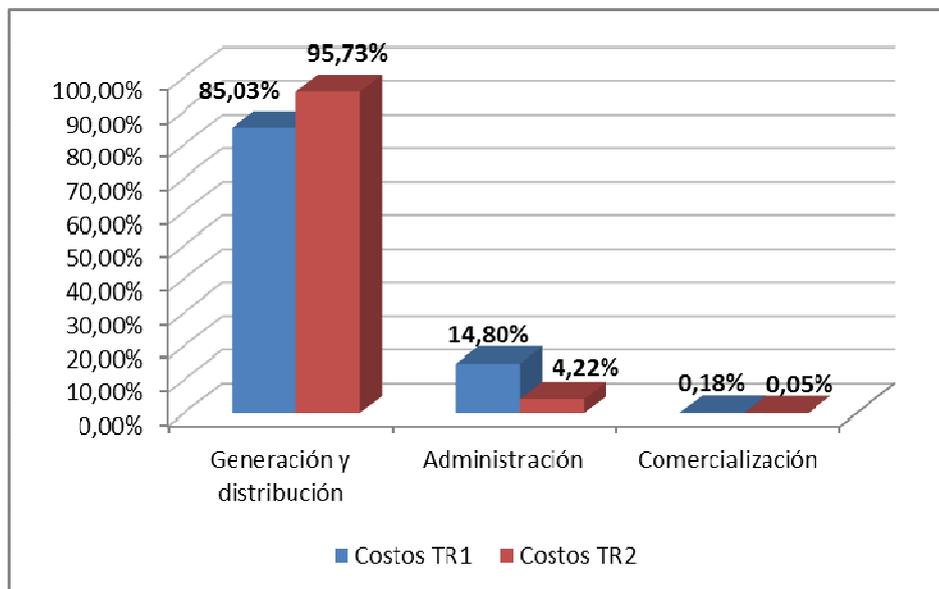


Figura 3. Porcentaje de incidencia de tipo de costos para TR1 y TR2

El cómputo de costos y gastos totales por año, arrojan los siguientes valores: \$102,39 cliente por mes para la TR1, y \$359,31 cliente por mes para la TR2.

Comparando específicamente los costos de “Generación y Distribución” para ambas tarifas, TR1 y TR2, en un año de operación, resultan los costos de la Tarifa Residencial 1 poco más de un 25% de los estimados para la tarifa TR2.

Existe una componente de costos que resulta de particular incidencia en la tipología “Generación y Distribución”, es la de “Mantenimiento” y está compuesta por la resultante de los valores estimados anuales en pesos de: viáticos, transporte, consumibles de mantenimiento, fallas de equipos y combustible. Para la tarifa TR1, el rubro “Mantenimiento” representa el 68% de los costos de “Generación y Distribución”, mientras que para la TR2 el impacto es del 92%.

Si se realiza un análisis particular de los costos de “Mantenimiento” para la TR1, éstos se presentan de la siguiente manera: predomina el ítem “Viáticos” con un 49%, continúa en orden decreciente “Fallas de equipos” con el 32%, sigue “Consumibles” con un 15% aprox. y por último “Transporte” y “Services” con resultados de 2,82% y 1,12% respectivamente. De la misma forma, para la tarifa residencial TR2, los ítems de “Mantenimiento” están compuestos por: “Fallas de equipos” con un 83,85%, sigue “Viáticos” con un porcentaje de 11,33%, “Consumibles” con 4,09%, “Transporte” con 0,53% y “Services” que expresa un resultado de 0,21%. Los porcentajes para ambas tarifas son representados en la Figura 4.

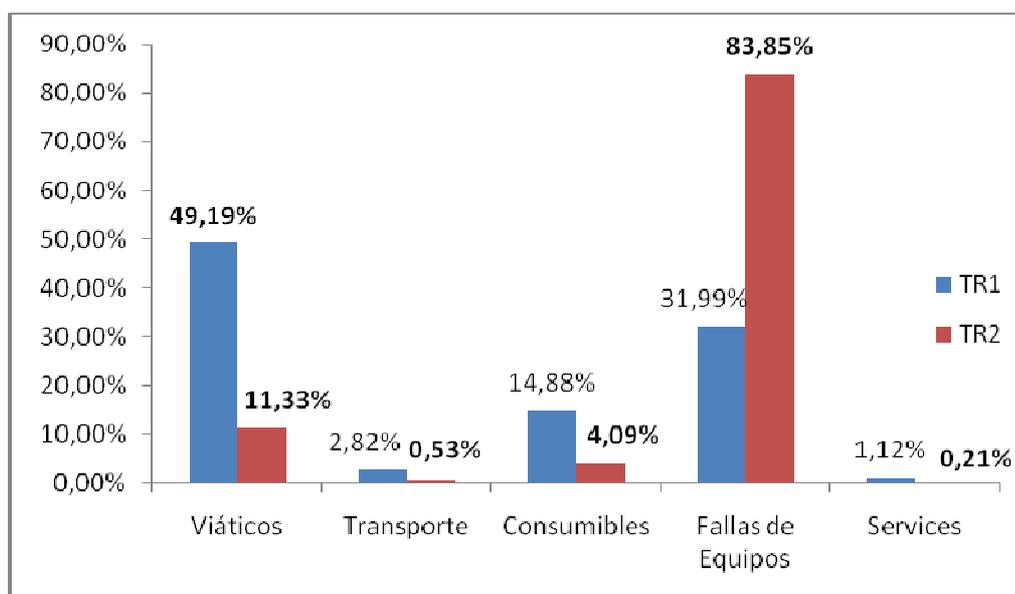


Figura 4. Porcentaje de costos de mantenimiento

Por último, la relación del Precio de Potencia Instalada por categoría, los resultados obtenidos son: \$0,95 Wp –Mes para la Tarifa Residencial 1, y \$0,62 Wp –Mes para la TR2.

CONCLUSIONES

Los datos censales no permiten cuantificar de manera fehaciente el mercado disperso total de la provincia. Aunque a través de la base de datos REDATAM se pudo incluir información de los hogares sin ningún tipo de energía en cada departamento, por lo que se puede inferir que la mayor parte de ellos se trataría de mercado disperso insatisfecho.

La información proveniente de otras fuentes provinciales permite determinar con mayor precisión el mercado disperso satisfecho; pero en relación al mercado disperso insatisfecho, no existe una individualización de los hogares. Esto último dificulta la estimación de la demanda futura (cantidad de usuarios) y tipo de soluciones tecnológicas a implementar.

El análisis de la necesidad de energía eléctrica de los usuarios residenciales muestra que existe, aún con la implementación de sistemas fotovoltaicos provenientes del financiamiento PERMER, una demanda insatisfecha actual en algunos hogares. También se detectó que el sistema fotovoltaico PERMER sería insuficiente en materia energética para la demanda futura (a 2 años) de esos hogares. Los hogares que pertenecen a minirredes y que experimentaron la tenencia del servicio de energía eléctrica (aún en forma discontinua) poseen una demanda potencial que supera ampliamente al de los hogares de puestos aislados. También se pudo analizar que la tecnología actual de los electrodomésticos tiene una incidencia importante y disminuye la carga de consumo de los hogares, por lo que permite un mayor aprovechamiento de los equipos de generación instalados.

Para las tarifas calculadas, que hacen sustentable al sistema organizativo de la prestataria del servicio, pueden existir usuarios que no cuenten con la capacidad de pago suficiente para afrontarlas. Si existe disponibilidad para el pago, es decir, aceptación del pago efectivo por un servicio de energía eléctrica. Se analizaron diversas alternativas para la elección de un criterio que permita determinar tarifas finales al usuario: subsidio a toda la población objeto, costo mensual en productos sustitutos, etc. Por no contar la provincia con un estudio social de los ingresos de los futuros usuarios residenciales, se adoptó una tarifa final que considera un porcentaje del 4% del ingreso único y mínimo del hogar (Asignación Universal por Hijo) donde la tarifa TR1 es cubierta en un 76,3% por el Estado Provincial y la tarifa TR2 en un 84,5%.

En relación a los componentes tarifarios, la tarifa TR1 se ve fuertemente influenciada por los costos de viáticos a los técnicos que efectúan las visitas anuales para la inspección. En el caso de la tarifa TR2, la situación es diferente, ya que los costos de mayor impacto son los correspondientes a la reposición de equipamiento por falla. El valor del precio de la potencia instalada para la TR2 representa un valor igual al 65,5% del valor de la TR1.

REFERENCIAS

- Bortolussi M. F. (2011). El sector de distribución eléctrica. Evolución y fijación de tarifas en un mercado regulado: Retribución de la base de capital y sostenibilidad en el tiempo.
- Cadena C. (2006). Electrificación o energización? Mediante energías alternativas en zonas rurales.
- Cadena, C.; Ottavianelli, E., Gómez Khairalla, A., Ferreiros, A. y Juárez C., (2013). Inclusión de indicadores sociales en el análisis de requerimientos Energéticos. El caso de la provincia de Salta.
- Chaile M. O., Javi V. M. (2013). Una encuesta para recolección de datos de reconocimiento social y cultural en poblaciones rurales donde se estudia la implementación de sistemas de energía solar.
- Contrato de concesión para la generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en el mercado disperso de la provincia Jujuy y Subanexos (1999).
- Facchini M., Andreoni A., Koleda A., Garay A., Balmaceda M. E. Modelo para el cálculo de tarifas de empresas eléctricas de distribución considerando aspectos económico-financieros.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). Censo 2001 y 2010, Argentina.
- IT Power Consultora, Clavin F., Combetto A., Badía J. P. (2011). Estudios de factibilidad del abastecimiento eléctrico de la población rural dispersa con energías renovables en la provincia de Catamarca
- Ramos Caro, C., Iriarte A., Cadena, C. (2017). Estudio Tarifario para el Mercado disperso de la provincia de Catamarca, Reunión ASADES.

ABSTRACT: The present work shows the summary of the methodology, and its subsequent analysis, for the determination of types of residential rate corresponding to individual users of the dispersed market of Catamarca. The development takes as a first alternative, the ongoing installation of photovoltaic systems financed by the Renewable Energy Project for Rural Markets PERMER. The second alternative consists of a proposal based on an analysis of the potential demand in dispersed households in the province. As for the selected method, a characterization and quantification of the dispersed provincial market is carried out first. Subsequently, and through previous studies and surveys in situ, the demand table for the two proposed categories of residential users is established. The rate for future users is obtained, and a comparative analysis of the tariff components is carried out. It incorporates the inclusion of social aspects linked to the ability to pay.

Keywords: dispersed market, tariffs, demand, residential, PERMER.

ACONDICIONAMIENTO BIOCLIMÁTICO Y LUMINICO DE UN CENTRO DE PROPAGACIÓN AGÁMICA DE PLANTAS EN INTA – CATAMARCA

V. García, A. Iriarte¹, S. Flores Larsen^{1,2}

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. victorgarcia958@gmail.com

Recibido 08/08/18, aceptado 12/09/18

RESUMEN

Este trabajo describe el acondicionamiento bioclimático y lumínico de un edificio, destinado a la producción agámica de plantas por cultivo invitro en la Estación Experimental del INTA Catamarca. Se realizaron monitoreo higrotérmico energético, lumínico del edificio y simulaciones con SIMEDIF para Windows desde el año 2008, para recomendar modificaciones con el objetivo de reducir los consumo energéticos y mejorar las condiciones edilicias. Con nuevas mediciones se verificó la reducción de las pérdidas de energías, especialmente en aquellas zonas en que se realizaron remodelaciones, disminuyendo el intercambio en el caso del techo en un 51%. Los cambios realizados en techo, en las ventanas norte de la sala de lavados de frascos mejoraron el ingreso de luz natural. La incorporación de un sistema anidólico, y de nuevos estantes para micropogación, redujo el consumo de energía eléctrica y la temperatura en la sala de cría.

Palabras claves: acondicionamiento bioclimático, iluminación natural, propagación agámica

INTRODUCCION

El desarrollo y crecimiento de las plantas depende, primero, de su constitución genética y segundo del ambiente. Este ambiente puede controlarse de varias formas cada una de las cuales tiene sus ventajas e inconvenientes de acuerdo a los requerimientos energéticos de las especies a cultivar, de la misma manera como se tratan los problemas en el trazado constructivo de los edificios para el control ambiental. Gilbert, Scott, F 2006.

Las tecnologías de acondicionamiento pasivo e híbrido integrados en edificios de uso agroindustrial permiten mejorar las condiciones ambientales, como ser las lumínicas y las térmicas, disminuir el uso de recursos energéticos, el impacto ambiental y la dependencia de instalaciones de acondicionamiento artificial. En la provincia de Catamarca, se propuso incorporar estos conceptos a un local de propagación agámica denominado Centro de Propagación Agámica, (CEPA), adaptado para las multiplicaciones de plantas hortícolas, frutícolas y autóctonas, de gran importancia para el desarrollo económico de la región.

En lo que respecta al aspecto constructivo del CEPA, se lo abordó desde distintos ángulos. En primer lugar a la reconversión de un edificio para el funcionamiento de un laboratorio. En segundo lugar, como una construcción que al no responder ambientalmente a los requerimientos para el funcionamiento como laboratorio, los usuarios terminan introduciendo métodos artificiales de

¹ Investigador del CONICET

² INENCO, UNSa

control ambiental, como medios de calefacción y aire acondicionado que funcionan con gas o con energía eléctrica, lo que eleva el consumo energético y genera una serie de inconvenientes por contaminación del ambiente. Y, en tercer lugar, con relación a los sistemas incorporados para ser utilizados en la producción de plantas que permitan disminuir los gastos de energía convencional.

Según estudios realizados en los últimos años, los edificios son grandes consumidores de los recursos extraídos de la Tierra y por lo tanto, se plantea como una necesidad perentoria el uso de materiales y sistemas constructivos apropiados. Este requerimiento ha aumentado considerablemente en el mundo en los últimos años, y se ha enfatizado en la selección de materiales de acuerdo al análisis de su ciclo de vida, el cual incluye los costos internos y externos producidos durante la extracción, fabricación, uso y eliminación de los mismos. La energía utilizada en edificios representa una importante proporción del total a nivel nacional, regional y local. Además, esta demanda energética depende fundamentalmente de su diseño y su resolución constructiva. La forma y orientación de los edificios, el tamaño, de las superficies vidriadas, los materiales y espesores de las capas aislantes tienen un fuerte impacto sobre el ambiente interior. Filippin C (2005).

En síntesis, en este trabajo se pretende, a partir de la evaluación de un edificio utilizado como un laboratorio para la propagación agámica de plantas, determinar las posibles estrategias bioclimáticas con uso racional de energía, empleando desarrollos, sistemas y herramientas para el acondicionamiento higrotérmico y lumínico de viviendas o edificios de servicios, que pueden ser utilizados en el diseño de edificios de interés comercial y/o industrial, especialmente de clima cálido seco. Aun cuando la investigación se desarrolló en el Valle Central de la Provincia de Catamarca, se aspira que los planteos presentados sean aplicables y transferidos a otras regiones con requerimientos y características ambientales similares.

El objetivo general del trabajo es el acondicionamiento bioclimático y lumínico de un edificio de bajo consumo energético destinado a la producción agámica de plantas por cultivo in vitro, en clima cálido seco.

CASO DE ESTUDIO

Diseño arquitectónico - térmico

El edificio se encuentra ubicado en el sector noroeste del campo experimental, de INTA en Sumalao – Valle Viejo, aislado de las demás instalaciones. Foto 1, fue construido en la década del 50, y cedido mediante convenio por las autoridades federales al Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA), para la creación de la Estación Experimental Agropecuaria de Catamarca en base del Vivero Olivícola Nacional en Sumalao, en el Departamento Valle Viejo. Durante varios años fue utilizado como vivienda por los directores de la Estación Experimental.

Consta de una planta, de tipología compacta rodeado de árboles, con sombras durante la mayor parte del día con un área total de 111,4 m² y un volumen de 309 m³. La ubicación geográfica y los datos climáticos característicos de la zona se muestran en la tabla 1.

LOCALIDAD	Sumalao Valle. Viejo	Temp. Media	12,8
PROVINCIA	Catamarca	Temp. máxima media	20,6
LATITUD	28,5	Temp. mínima media	6,4
LONGITUD	60,3	Temp. diseño invierno	1,9
ASNM	525	Grados días (18° C)	426
ZONA BIOAMBIENTAL	I Subzona Ia	Grados días (20° C)	694
		Grados días (22° C)	1000

Tabla 1.- Datos climáticos área Catamarca (INTA)

Distribución de las áreas de trabajo

Para poder entender la funcionalidad existente de esta edificación, se muestran los planos de la planta y corte del edificio en estado actual. Figuras 1.- 2.-

El centro experimental utilizado para producir plantas micropropagadas, consta de 9 espacios que se agrupan según su uso en dos áreas: **el área de recepción**, que consta de un hall de entrada, un baño y una oficina de recepción en la zona central, en la que se concentra la mayor actividad de las personas que trabajan en el laboratorio (de lunes a viernes de 9 a 13 hs), y el **área de micropropagación**, constituida por una sala de lavado de frascos y dosificación de medios de cultivos (C), un local para la práctica in-vitro llamada cámara de cría (D), una cámara de siembra (E), una sala de preparación de medios de cultivo, de almacenamiento de drogas e instrumental (H y G), un laboratorio de análisis inmunológicos (B) y un laboratorio de biología molecular (I). Los detalles constructivos en general fueron descritos en García et al 2008, García et al. 2009.

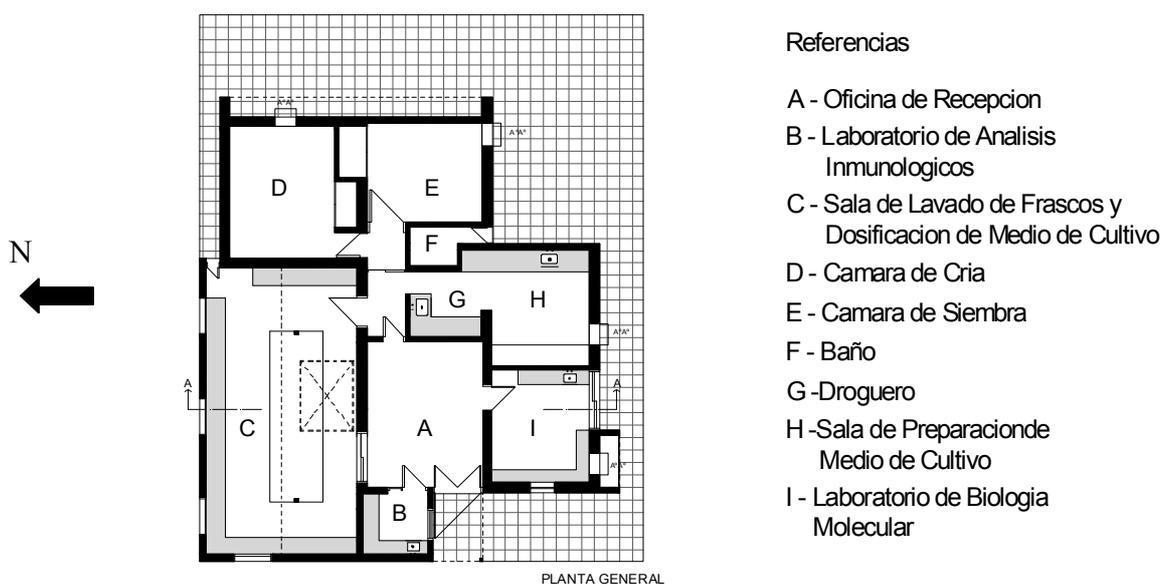


Figura 1.- Esquema de la distribución de laboratorios dentro del CEPA

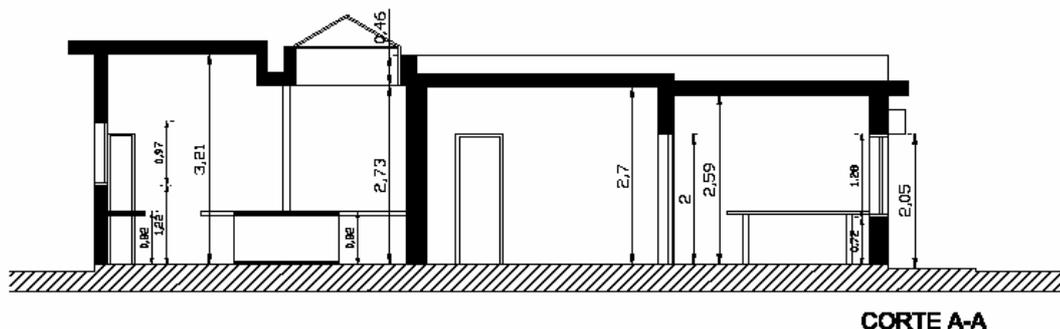


Figura 2.- Corte del edificio.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cálculo del coeficiente volumétrico del edificio

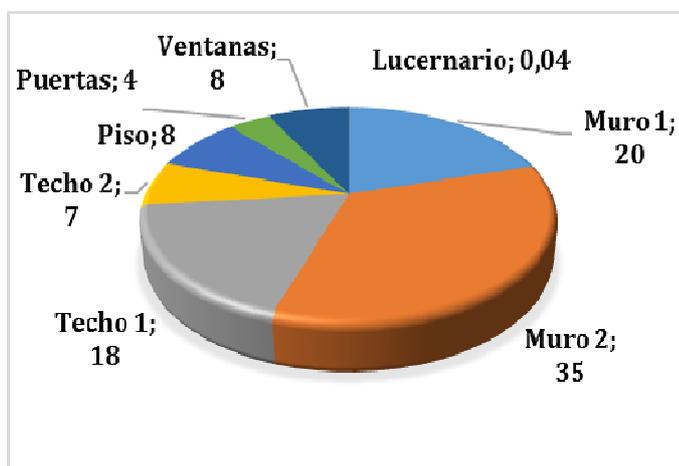
El período seleccionado para la contrastación térmica del edificio en su construcción inicial y la modificación de techo es el comprendido entre el 9 y el 17 de enero de 2009. En la tabla 2 se muestran los valores mínimos, máximos, y promedio de temperatura, humedad relativa. Los valores de radiación estuvieron entre los 831 y 1100 W.m⁻²,

Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura media [°C]	Amplitud térmica [°C]	H.R. mínima [%]	H.R. máxima [%]
14.85	44.40	28.34	30.5	14.25	99.25

Tabla 2.- Temperaturas y humedades relativas entre 9 y 17 de enero 2009

El cálculo de las pérdidas de calor por transmisión; se consideró el calor que se pierde del interior del edificio; debido a la transmisión a través de los muros; los cerramientos (opacos y no opacos), el piso, y el techo y las pérdidas por infiltraciones de aire a través de carpinterías para $n = 1$.

Este estudio, nos permitió deducir que es importante retener la mayor cantidad de energía en forma de calor en el interior del edificio, y es válido para entender la importancia de contar con una cubierta que tenga un comportamiento apropiado a esos requerimientos. En relación directa con el diseño del edificio, el sector construido para la ampliación del edificio (sector C y D, muro 2 y techo 2), las paredes norte con bloques de cemento es la de mayor superficie expuesta a la pérdida de calor por transmisión $212,22 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Esto lo podemos ver en la gráfica 1 analizando las pérdidas de calor de cada cerramiento, que esta nueva construcción realizada con block (muro 2), tiene un 34,60 %, de un total de $613,34 \text{ W/m}^2\text{°C}$.



Gráfica 1.- Pérdidas de calor de los cerramientos del edificio en por ciento.

Las pérdidas de calor volumétricas por infiltración y totales del edificio se muestran en las tablas 3 y 4.

PÉRDIDAS VOLUMÉTRICAS POR INFILTRACION DE AIRE ($0,35 \times n$)	N	Pérdida n $\text{W/m}^3\text{°C}$
		1

Tabla 3.- Pérdidas de calor volumétricas por infiltración.

Volumen del edificio	339 m^3
Pérdidas por transmisión + pérdidas por infiltración de aire	$721,49 \text{ W/°C}$

Tabla 4.- Pérdidas totales.

En la tabla 5, se muestra las pérdidas de calor volumétrico del edificio con un valor de $2,33 \text{ W/m}^3\text{°C}$, mientras que el G admisible es de $1,7 \text{ W/m}^3\text{°C}$.

PERDIDA DE CALOR VOLUMÉTRICA POR LOS CERRAMIENTOS Y POR INFILTRACION	$G = q/V$	$W/m^3 \cdot C$	G = 2,33
G Admisible		$W/m^3 \cdot C$	Gad = 1,7

Tabla 5. Cálculo de pérdidas de calor volumétrico por los cerramientos.

Humedad del aire en la estructura del edificio

También, se examinó la influencia de la humedad del aire en las paredes que rodean el CEPA, en invierno, cuando la temperatura superficial o interior de las paredes y ventanas caen por debajo de la temperatura en el ambiente, con el riesgo de descender por debajo del punto de rocío.

Se comprobó la condensación para los dos locales que posee mayor superficie vidriada, la sala de lavado de frascos, y el laboratorio de biología molecular, teniendo en cuenta la temperatura ambiente, humedades relativas, los coeficientes convectivos interior y exterior.

En la tabla 6 se detallan los datos utilizados para el cálculo de la temperatura superficial del vidrio.

e_{vidrio}	k_{vidrio}	h_i	h_e	K	t_{int}	t_{ext}	Δt	Q	t_{sv}	t_r
Sala de lavado de frascos										
0,003	1,05	6	10	3,71	13,6	-2,4	-15,4	-57,14	3,48	8,6
Laboratorio de biología molecular										
0,003	1,05	6	10	3,71	11	-2,4	-13,4	-49,72	2,71	3,5

Tabla 6.- Temperatura superficial del vidrio y punto de rocío para sala de lavado de frascos y laboratorio de biología molecular

Se comprueba que en la sala de lavado de frascos la temperatura de la superficie del vidrio de la ventana se encuentra por debajo, 3,84 °C, que la temperatura de punto de rocío del ambiente del local, 8,6 °C, por lo que se observa condensación en el vidrio. Ocurre lo mismo en el vidrio de la ventana del laboratorio de biología molecular con una temperatura menor al que se calculó para la temperatura de rocío interior.

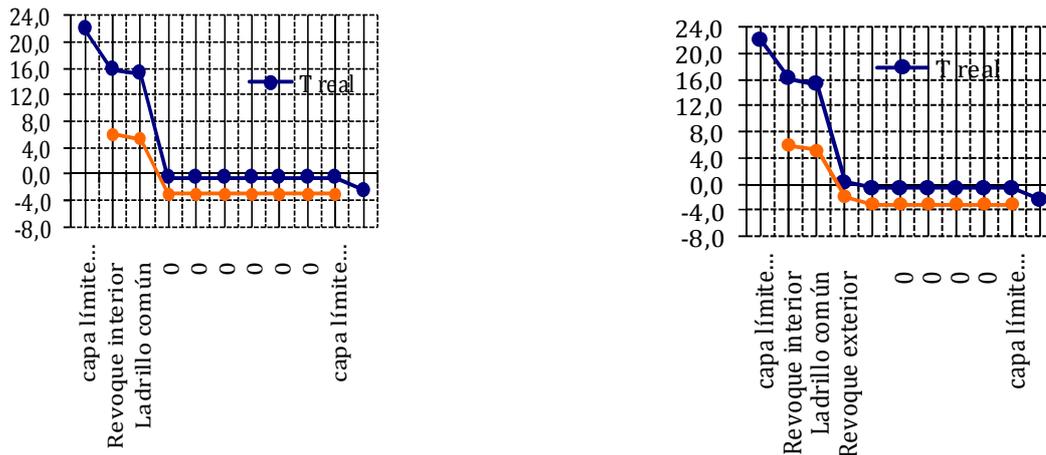
Esto hace que la carpintería de las ventanas, al ser metálicas sufran una oxidación lo que requiere de un cuidado más continuo.

Condensación en mampostería

Utilizando la tabla se determinó los riesgos de condensación de las paredes en contacto con el exterior de los locales cámara de cría, laboratorio de biología molecular, para un día del mes de invierno.

Las paredes Norte y Este de la Cámara de cría, al tener la misma estructura constructiva (block) se observa que no hubo condensación en ninguna de ellas para la temperatura interior prevista para este local de 22 °C para el día más frío de -2,4 °C, y humedades 35 % y 95,5 % en el interior y exterior respectivamente, figura 3.

En la figura 4, se observa el comportamiento de las paredes del Laboratorio Biología Molecular que para temperatura ambiente interior del local de 11 °C y una temperatura exterior de -2,4 °C y humedades entre 60 % y 95,25 % para el interior y exterior respectivamente, no se registraron riesgo de condensación en ninguna de las paredes.



Fiura 3.- Comportamiento del riesgo de condensación de las Paredes Norte (izquierda) y Este (derecha) de la cámara de cría

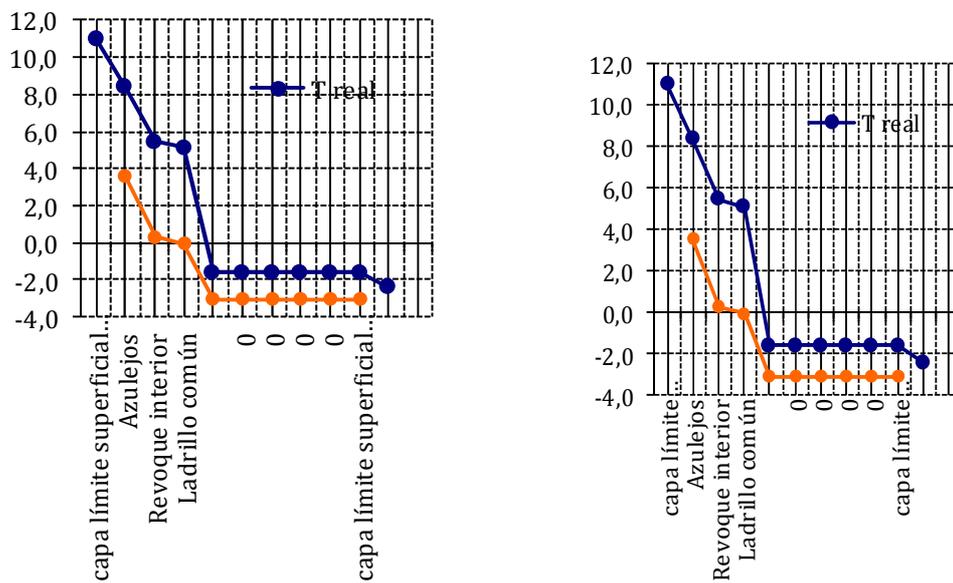


Figura 4.- Comportamiento del riesgo de condensación laboratorio de biología molecular

Modificaciones realizadas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se planteó como estrategia bioclimática recomendar la modificación del techo al que se agregó en todo su superficie placas de poliestireno expandido de 0,25 kg/m³, de densidad aparente, 0.05 m de espesor, conductividad térmica 0,033 W/m.K, protegido con una capa de protección de mortero liviano con k = 0,89 W/m.K, a continuación baldosas cerámicas tipo bovedilla de 0.025 m de espesor y k = 0,76 W/m.K. Figura 5. Esto permitió reducir un 51% la pérdida de energía respecto a su condición inicial.

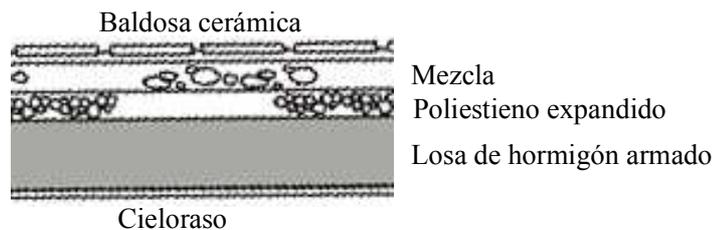


Figura 5.- Techo con aislación

En las fotos 1 y 2, se muestran las modificaciones realizadas en el techo.



Foto 1.- Construcción techo con aislación



Foto 2.- Terminación techo modificado

Simulación con SIMEDIF

Para predecir el comportamiento del edificio y las modificaciones realizadas a partir de la contrastación con los datos experimentales se realizó ambas simulaciones utilizando el programa SIMEDIF para WINDOWS (García V. et al 2009)

Las contrastaciones se realizaron entre: las primeras simulaciones que se realizaron para predecir el comportamiento del edificio, ajustadas con los valores obtenidos experimentalmente, y la simulación obtenida con las modificaciones propuestas de aquella.

En esta última simulación, se tuvo en cuenta los nuevos elementos agregados en el techo, corrigiéndose los coeficientes de absorción, las capas de las paredes, y los correspondientes a las características físicas de cada material. Debido a la masa del edificio fue necesario realizar la simulación de su comportamiento térmico durante cinco días previos a fin de lograr el régimen estacionario bajo condiciones iniciales de temperatura medidas.

Entre los espacios importantes del Centro experimental es la Sala de lavado y dosificación de medios de cultivos y el laboratorio de microbiología. En la figura 6, se presenta los resultados de la simulación de la sala de lavado, se observa como el comportamiento de las tres simulaciones sin remodelación (T. S. de lav. [inicial]), y las modificaciones en el techo (con techo aislado) y paredes norte y oeste (con paredes aisladas), se comportan de manera similar con 0,5 °C de diferencia entre Se debe tener en cuenta que este local tiene tres ventanas vidriadas orientadas hacia el Norte sin ningún tipo de protección y otra hacia el oeste, además de un lucernario en el techo.

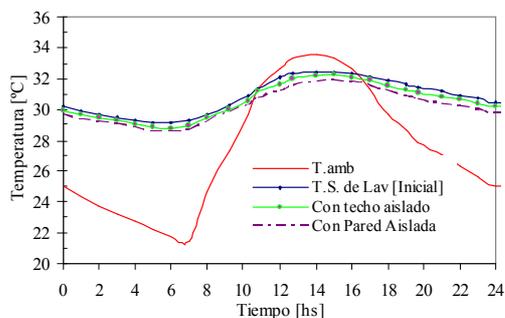


Figura 6.- Temperaturas simuladas, y exterior de la Sala de Lavado

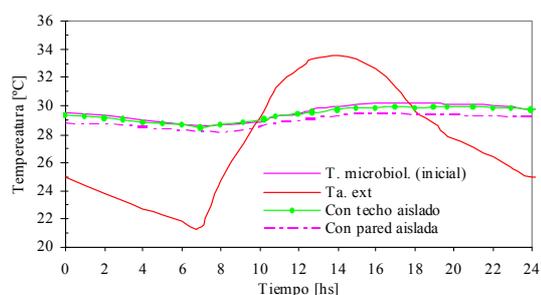


Figura 7.- Temperaturas simuladas, exterior del Laboratorio de microbiología.

En la figura 7, se observa el comportamiento térmico del laboratorio de Microbiología, utilizado para realizar Análisis Inmunológicos. Este local, fue el último en construirse, tiene sus paredes expuestas al oeste, y al sur. De los valores registrados, el desfase entre las temperaturas simuladas de las situaciones, iniciales [T. microbiol. (inicial)], y la simulada con techo remodelado y pared oeste modificada, está comprendido entre 0,5 °C y 1,5 °C.

Iluminación

Teniendo en cuenta la ubicación, orientación y distribución de los laboratorios en el edificio se consideró apropiado realizar el estudio de modificación para la incorporación de sistema de iluminación natural en la sala de dosificación de medios de cultivos y en la cámara de cría.

La sala de dosificación tiene tres ventanas unilaterales vidriadas sin celosías ubicadas en la fachada norte, foto 3. Además en el techo existía un lucernario de 3.75 m², para aportar un mayor ingreso de luz al local, foto 4



Foto 3.- Ventanas de la sala de lavado orientadas hacia el Norte.



Foto 4.- Lucernario de la sala de lavado.

Todas estas aberturas, unilaterales y cenital, carecían de elementos de control de la iluminación directa, permitiendo en distintas estaciones del año y horas del día el acceso de radiación solar directa. Esto generaba riesgo de deslumbramiento, tanto fisiológico como psicológico, para los técnicos, además del malestar térmico debido a la radiación directa sin control estacional.

A los efectos de resolver los riesgos de discomfort visual de los usuarios de la sala de lavado y a su vez con el objetivo de mejorar las condiciones de aprovechamiento energético de la luz natural, se diseñaron dos estrategias específicas:

Estantes en ventanas laterales

Para el control de la luz directa solar, ingresando sobre las ventanas ubicadas en la fachada norte, se construyeron siete estantes metálicos pintados de blanco sintético para cada ventana de 0,20 m de ancho, figura 8, amurados a la pared, foto 5.



Figura 8.- Detalle de los estantes de control y redirección.



Foto 5.- Ubicación de los estantes de luz en ventanas de la fachada norte.

Lucernario

La segunda alternativa propuesta, fue reemplazar el lucernario, mediante el diseño de un colector solar con abertura lateral hacia el norte, limitando así la cantidad y priorizando la óptima orientación. Se realizó el estudio de los rayos solares que ingresarían al local obteniéndose el trazado que se muestra en la figura 9. La estrategia de control de la radiación directa, en este caso es la difusión mediante una placa de policarbonato alveolar blanco translúcido colocado en el interior del colector. En la foto 6, se muestra el sistema construido en el techo del edificio. Con esta modificación se logró reducir el riesgo de deslumbramiento sobre el campo visual de los usuarios.

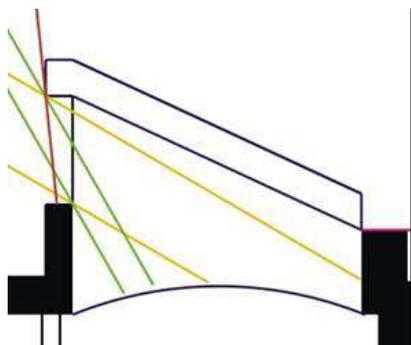


Figura 9.- Trazado de los rayos de incidencia sobre iluminación cenital propuesta



Foto 6.- Ingreso de radiación cenital norte..

Sistema de iluminación natural anidólico para la cámara de cría.

Los cultivos in vitro generalmente son incubados en salas de crecimiento o cría, en general, bajo condiciones de luz artificial a un régimen de luz y temperatura controlada. Las salas de cría son locales equipados con tubos fluorescentes con altos costos de consumo y mantenimiento. Su manejo puede frecuentemente ser interrumpido por cortes de servicio eléctrico o por dificultades para reponer partes del servicio.

Ante esta situación se plantearon desarrollos tecnológicos tendientes a sustituir el consumo energético convencional se trabajó para construir un sistema de iluminación natural de tipo anidólico (Pattini et al., 2009) para reducir el consumo de electricidad dentro de la cámara de cría, y una estantería con nuevas bandejas y lámparas de bajo consumo.

Para realizar los primeros ensayos de un sistema anidólico a incorporar en la sala de cría del CEPA se utilizó un prototipo experimental ubicado en el predio de la Universidad Nacional de Catamarca, (28°45' Latitud Sur -65°78' Longitud Oeste).

Consiste en un local de 14 m², para los ensayos experimentales, se adaptó sobre el muro orientado al Norte, un sistema pasivo de iluminación natural de tipo anidólico, con una longitud de 4,00 m y una altura de 0,20 m que sobresale 0,40 m fuera del plano de la fachada una vez instalado, Foto 7. Las mediciones dentro de la sala experimental fueron tomadas variando las condiciones de iluminación utilizando un cielo raso suspendido como difusor, realizado con una placa de policarbonato alveolar de 8 mm de acabado transparente (Foto 8).



Foto 7.- Anidólico en el exterior de sala experimental



Foto 8.- Anidólico con difusor en interior de sala experimental

Los datos obtenidos se escribieron en la tabla 7, donde se muestran los resultados en lumens del aporte de luz natural del sistema al ambiente interior. A partir de estos resultados, y con el objetivo de evaluar cuál es el potencial de ahorro energético generado, se calculó una instalación de tubos fluorescentes cuyo flujo lumínico sea equiparable los niveles de flujo aportados por el sistema anidólico.

Hora	Tipo de cielo	
	Cubierto	Despejado
10	-	50751 lm
13	8269 lm	379473 lm

Tabla 7.- Valores de flujo aportados por el sistema anidólico, expresados en lumens.

La comparación entre ambos sistemas permitió establecer una primera aproximación del ahorro en watts/hora factible de ser alcanzado. De esta manera, se determinó mediante catálogo que los tipos de tubos a utilizar, adecuados por su distribución espectral, poseen una eficiencia aproximada de 38,7 lm/W. (OSRAM, 2008).

En la tabla 8, se puede ver para cada flujo registrado la cantidad de tubos fluorescentes necesarios para lograr un flujo equivalente, el flujo entregado individualmente por cada fuente, y el consumo de la instalación en Wh.

Si bien el cálculo propuesto no contempla el consumo de los sistemas de balastos, necesarios para el funcionamiento de las fuentes fluorescentes, o el consumo eléctrico generado por posibles estrategias de refrigeración que permitan mantener el interior del recinto de la sala de Cría dentro del rango de temperaturas adecuado para el desarrollo de los tejidos vegetales, podemos ver claramente que, aún en las situaciones lumínicas exteriores más desfavorables como son las de los meses de invierno, la aplicación de un Sistema Pasivo de Iluminación Natural permitiría un ahorro estimado del consumo eléctrico destinado a iluminación de entre 213 Wh y 9781 Wh.

Flujo	Fuente	Lumnes por unidad	Consumo unitario (W)	Cantidad necesaria	Consumo total (W/h)
8269	Fluora L58 W/77	2250	58	3,67	213
50751	Fluora L58 W/78	2250	58	22,5	1308
379473	Fluora L58 W/79	2250	58	168,65	9781

Tabla 8.- Consumos estimados para instalaciones de iluminación artificial con entrega de flujos equivalentes

Estantes con luz para la cámara de cría

En general el cultivo *in vitro* se lleva a cabo en salas de cultivos, aisladas, con buena iluminación, fotoperiodo controlable y un buen sistema de control de temperatura, estanterías para la colocación de los frascos con un sistema de iluminación adecuado cuyos costos dependerán de la cantidad de estantes y de la cantidad y tipo de luminaria que se utilice.

La foto 9, muestra una estantería en la cámara de cría, con estantes de madera y tubos de luz fluorescentes lo que produce un gran consumo y el uso de una importante cantidad de arrancadores y balastos con su correspondiente cableado.

Se propuso un nuevo sistema de estantería para los frascos con una estructura de madera mientras que los estantes fueron reemplazados por vidrios de 3 mm de espesor colocándose en el medio de cada uno de ellos lámparas de FLUORA T8 OSRAM L 36 W/77, lámparas fluorescentes tubulares 26 mm, con casquillo G13. Foto 10. Estas lámparas, son utilizadas para el cultivo de plantas pues favorecen los procedimientos fotobiológicos siendo importante para su crecimiento, también se las puede utilizar en edificios públicos, oficinas, comercios etc. Son de bajo consumo con las que se logra un importante ahorro de mantenimiento tanto económico (se prescinde de los arrancadores y balastos y su correspondiente cableado) como en trabajo.



Foto 9.- Estanterías en la cámara de cría de vidrio y madera.



Foto 10.- Estantería propuesta con lámparas FLUORA

CONCLUSIONES

Después de haber realizado las evaluaciones de las posibles estrategias bioclimática y utilizando desarrollos, sistemas y herramientas para el mejoramiento higrotérmico y lumínico, se llega a la conclusión de que es posible la remodelación del edificio utilizado como Centro de Propagación Agámica reduciendo el consumo energético de combustibles convencionales y apto para la obtención de plantas de alta calidad.

El uso de SIMEDIF permitió realizar un análisis del comportamiento térmico durante dos periodos del edificio, así como un estudio del diseño del edificio y de posibles alternativas de mejora y eficiencia energética

El programa predijo de forma aceptable el comportamiento térmico del edificio, las temperaturas medias de los locales y sus amplitudes térmicas.

El buen ajuste que se alcanzó en la simulación, tanto en invierno como en verano, permitió asegurar que el modelo térmico obtenido es adecuado para evaluar la tipología y la estructura del edificio de

acuerdo a las características climáticas del lugar y para otras estaciones del año, lo que posibilitará recomendar posibles soluciones para disminuir el consumo de energía durante los tiempos en que se utiliza el edificio.

Las condiciones térmicas y lumínicas que se llegan a alcanzar en los espacios para el uso de los técnicos, evidencian que las alternativas utilizadas son válidas a considerarse en el diseño de edificios bioclimáticos mejorando el confort durante las horas de trabajo. A partir de la identificación y comprensión de los fenómenos que giran alrededor del desempeño energético de un edificio bioclimático, es posible proponer alternativas y detalles concretos que permitan transformar laboratorios de las características enunciadas más agradables y confortables, con consumo eficiente de energía.

BIBLIOGRAFIA

- Filippín C. (2005). Uso eficiente de la energía en edificios. Ediciones Amerindia, Santa Rosa, La Pampa.
- García, V; Iriarte, A.; Flores, S. y Lesino, G., (2008). Monitoreo Higrotérmico de un Edificio Acondicionado para Propagación Agámica de Plantas, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 12, Sección 2, pp. 29 – 36. ISSN 0329-5184. Argentina.
- García, V; Iriarte, A.; Flores, S., Lesino, G. y Mendoza, S., (2009). Auditoría y Simulación Térmica de un Edificio para Producción Agámica de Plantas, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 13, Sección 2, pp. 19 – 25. ISSN 0329-5184. Argentina.
- Gilbert, Scott, F 2006. Biología del desarrollo. 7ª edición. Trad José Luis Ferrán. Editorial panamericana. Buenos Aires.
- Pattini, A.; Villalba, A.; García, V.; Ferrón, L.; Iriarte, A. y Lesino, G., (2009). Diseño de un Sistema de Iluminación Natural Anidólico para el Centro de Propagación Agámica INTA-Catamarca, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 13, Sección 5, pp. 121 – 126. ISSN 0329-5184. Argentina.

ABSTRACT

This paper describes the bioclimatic and light conditioning of a building intended for agamic production of in vitro crop growing in the Experimental Station INTA Catamarca. Hygrothermic and light monitoring of the building and SIMEDIF simulations for Windows were carried out since 2008 in order to recommend modifications so as to save energy and improve building conditions. With new measures, energy saving was checked, especially where remodeling was made, reducing interchange of the roof in 51%. Repair work in the roof, and in the North windows of the jar washing room improved day light intake. The use of an anidolic system and new micro propagation shelves saved energy and reduced temperature in the growing chamber.

Key words: bioclimatic conditioning, natural lighting, agamic propagation

RE-EVALUACION DE UN PLAN DE SEGURIDAD DEL AGUA (PSA): MEDIDAS DE CONTROL Y CONCEPTO DE RIESGO VIRTUAL Y REAL

M. A. Gutiérrez López¹, M. S. Rodríguez Alvarez^{2*}, M. A. Iribarnegaray³, A. M. Clavijo Lara⁴, L. Seghezzo⁵

Grupo de Estudios e Investigaciones Socio-Ambientales (GEISA), Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Avda. Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina Tel. +54-387-4255516; *E-mail: solerod22@gmail.com

Recibido 05/08/18, aceptado 07/09/18

RESUMEN:

El objetivo de este trabajo es realizar una re-evaluación de un PSA desarrollado en la ciudad de Salta, Argentina, con enfoque específico en el análisis de las medidas de control y el cálculo de los riesgos en el periodo 2012-2016. Se definen los conceptos de Riesgo Virtual y Riesgo Real para visualizar claramente cuáles son las medidas de control que permiten una disminución concreta del riesgo de las que no. Se realizó una revisión de los umbrales de riesgo y un análisis de su relevancia en el desarrollo de un PSA. Los resultados demuestran que el riesgo real siempre fue mayor al calculado y que el umbral de riesgo aceptable utilizado en la actualidad es muy exigente para poder ser cumplido en esta etapa. Los resultados obtenidos son parte indispensable de una re-evaluación de un PSA que luego se complementará con verificación a campo y validación del mismo.

Palabras claves: re-evaluación, PSA, riesgos, Salta.

INTRODUCCION

Un suministro fiable de agua de consumo es fundamental para una comunidad saludable y para su desarrollo económico (Bartram *et al.*, 2009). Son numerosos los riesgos asociados a una mala calidad del agua, algunos pueden causar enfermedades crónicas y otros, como los peligros microbiológicos, pueden causar enfermedades agudas tales como la diarrea, siendo una amenaza para la salud. A nivel mundial las enfermedades diarreicas son la segunda mayor causa de muerte de niños menores de cinco años, a pesar de ser enfermedades prevenibles y tratables. Una proporción significativa de las enfermedades diarreicas se puede prevenir mediante el acceso al agua potable y a servicios adecuados de saneamiento e higiene (OMS, 2017). En la provincia de Salta las enfermedades relacionadas con el sistema digestivo, infecciones y parásitos se encuentran entre las 10 primeras causas de defunción en mayores de un año, según el “Anuario Estadístico – Provincia de Salta. Año 2015 – Avance 2016” de la dirección General de Estadísticas de Salta (DGEPS, 2016).

En Argentina, el control de la calidad microbiológica del agua de consumo se encuentra establecido por el Código Alimentario Argentino (CAA, 2014), que debe ser utilizado como guía de calidad por las empresas encargadas de la potabilización del agua. Sin embargo, los parámetros microbiológicos a los que se refiere el CAA se limitan solamente a organismos indicadores (bacterias coliformes, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y bacterias aerobias mesófilas) que no siempre

¹ Estudiante de la Facultad de Ciencias Naturales, UNSa

² Becaria posdoctoral del CONICET, INENCO

³ Investigador Asistente del CONICET, INENCO

⁴ Becaria posdoctoral del CONICET, INENCO

⁵ Investigador Independiente del CONICET, INENCO

son eficaces cuando se trata de evaluar la eficiencia de remoción de parásitos patógenos y de virus en las plantas potabilizadoras de agua (Abramovich *et al.*, 2000; Hruday y Hruday, 2004, Rodríguez-Alvarez *et al.*, 2017a). En los casos en que no se cumplen las normativas se toman medidas correctivas, cuando lo ideal sería tomar medidas preventivas, ya que una vez que se ha detectado una contaminación, el agua ya habrá llegado a miles de consumidores. En este sentido, la OMS promueve la adopción de un método de análisis y gestión de riesgos para desarrollar normativas adaptadas a la situación de cada región (WHO, 2011). La gestión de riesgos proporciona un marco para una gestión preventiva de la seguridad del agua de consumo, cuyo primer componente es la implementación de objetivos basados en la salud (health-based targets).

Durante la última década, varias estrategias basadas en enfoques de control y gestión de riesgos se han desarrollado y aplicado a los sistemas de abastecimiento de agua con el fin de mejorar la seguridad del agua potable. Según Bartram *et al.*, (2009), la forma más eficaz de garantizar sistemáticamente la seguridad de un sistema de abastecimiento de agua de consumo es aplicando una evaluación y gestión integral de los riesgos que abarque todas las etapas del sistema de abastecimiento, desde la cuenca de captación hasta la llegada al consumidor, controlando cada uno de los peligros asociados al proceso de potabilización de manera de prevenir la contaminación antes que esta ocurra. Este tipo de planteamiento es lo que se ha denominado Plan de Seguridad de Agua (PSA). Durante el desarrollo de un PSA, los riesgos se abordan de una manera semi-cuantitativa con base en la experiencia de los operadores y los estándares del sector y están sujetas en gran medida a la interpretación personal. El PSA es un planteamiento racional para el control de los riesgos y supera las múltiples debilidades del enfoque de la inspección sanitaria y el enfoque correctivo, al centrar el interés sobre aquellos factores que influyen directamente en la inocuidad del agua. De esta manera, el PSA es una herramienta que permite identificar a lo largo del proceso de potabilización, captación, tratamiento o distribución los peligros inherentes, caracterizarlos según la probabilidad de ocurrencia y gravedad, estimar el riesgo asociado a cada peligro y aplicar medidas de control para prevenir problemas en el agua de consumo y la posible transmisión de enfermedades (WHO, 2014). En todas estas etapas, abordadas en talleres, existe consenso de todas las partes interesadas. Con un PSA es posible minimizar la vulnerabilidad y la contaminación del agua en las fuentes de abastecimiento promoviendo la aplicación de buenas prácticas en la operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento de agua, como así también prevenir la re-contaminación del agua durante el almacenamiento y distribución hasta el lugar de consumo. La metodología de Bartram *et al.* (2009) fue modificada por Seghezzeo *et al.* (2013) para poder ser aplicada al sistema de abastecimiento de Salta. Principalmente se utilizó una escala del 0 al 100 para la valoración de la probabilidad y gravedad de los peligros por considerarse una escala más intuitiva. Asimismo, se realizó una valoración de las medidas de control de manera de abordar los riesgos y la asignación de fondos a aquellos peligros más significativos y con mayor impacto en la calidad del agua.

Un PSA es útil solo si se aplica y se revisa. Los objetivos de este trabajo se centran en la revisión de las medidas de control y las evaluaciones del riesgo llevadas a cabo durante los cinco años de implementación de un PSA por parte de una empresa prestadora del servicio de agua en Salta. Esta etapa forma parte del módulo 6 del “Manual para el desarrollo de Planes de Seguridad del Agua” de Bartram *et al.* (2009), y se realiza con el fin de examinar, documentar y formalizar las prácticas que dieron resultado y, en algunos casos, aplicar medidas de control nuevas o mejorar las existentes. Asimismo, introduciremos los conceptos de “riesgo real” y “riesgo virtual”, y diferenciaremos aquellas medidas de control que tienen un impacto real sobre un peligro dado provocando una disminución real del riesgo (riesgo real), de aquellas que no tienen un impacto directo (riesgo virtual).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este trabajo se basa en la reevaluación de un PSA desarrollado en la ciudad de Salta, capital de la provincia de Salta, Argentina. La ciudad de Salta se ubica en el centro geográfico del Valle de Lerma,

a 24°51' de latitud Sur, 65°29' de longitud Oeste y 1187 metros sobre el nivel del mar. El clima se define como subtropical serrano con estación seca. Las precipitaciones son de carácter torrencial y se concentran entre los meses de noviembre a marzo, lo que condiciona el abastecimiento de agua a partir de fuentes superficiales. Las precipitaciones son irregulares, consecuencia de la fuerte orografía regional. La temperatura media del ambiente es de 16.5°C y la precipitación media anual ronda los 700 mm (Arias y Bianchi, 1996).

Plan de Seguridad de Agua (PSA)

El presente estudio se realizó en el marco de un PSA que fue aplicado a los sistemas de abastecimiento de agua de la ciudad de Salta. En particular, se presentan los resultados de análisis de las fuentes de agua superficial. En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de estos sistemas. Por cuestiones de confidencialidad de los datos, los sistemas se enumeran como Sistema N°1, Sistema N°2 y Sistema N°3. Estos sistemas se diferencian por la cuenca de abastecimiento de cada uno y su correspondiente área de influencia. En cada sistema se llevan a cabo los procesos de captación (superficial y/o subálvea), transporte (aducción y conducción) y potabilización y distribución. En un estudio previo se detectó que el sistema de distribución pudo disminuir sus riesgos a un valor umbral (Rodríguez Alvarez *et al.* (2017b), por lo cual en el presente trabajo se realizará el análisis de los sistemas desde la captación hasta la potabilización. En el desarrollo del PSA se determinaron una serie de eventos peligrosos que representan un peligro en un sistema de abastecimiento de agua. Los peligros son aquellos agentes físicos, biológicos, químicos o radiológicos que pueden dañar la salud pública. Cada evento peligroso fue evaluado en función del riesgo que implica para la seguridad del sistema, pudiendo afectar a uno o más procesos o sub-procesos. Una vez determinados la existencia y la magnitud de los riesgos, la empresa prestataria del servicio debe establecer un plan de medidas de control y optimización del sistema.

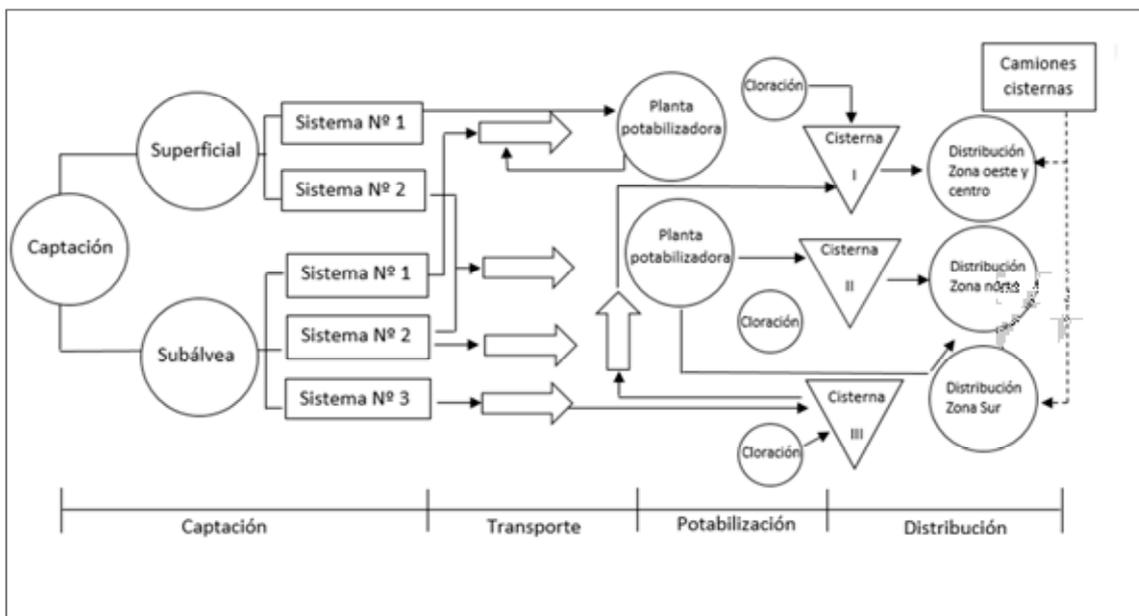


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema de agua en Salta. Los procesos individuales están indicados en la línea inferior.

El riesgo calculado fue clasificado en diferentes categorías. La escala adoptada se basó en la escala de sustentabilidad propuesta por Bossel (1999) y se puede ver en la primer columna de la Tabla 1. Durante el taller inicial de PSA, que se llevó a cabo en conjunto con del equipo de investigación del INENCO, se estableció un valor umbral de riesgo aceptable igual a 24. Posteriormente la empresa modificó el valor umbral y los rangos de clasificación, aumentando el nivel de exigencia. Es importante destacar que una de las premisas en la implementación de un PSA es la adaptación de la metodología a los diferentes sistemas de potabilización y exigencias propias de una empresa, municipio o región. Los umbrales y rangos tenidos en cuenta desde el 2012 en adelante se muestran en la columna 2 de la Tabla 1.

Tabla 1: Rango de valores y clasificación de Riesgos.

Valor inicial establecido en 2011 (Seghezzo <i>et al.</i> , 2013)	Valor modificado por la empresa desde 2012	Clasificación
< 25	< 15	Bajo
25 – 50	15 – 34	Medio
50 – 75	40 – 64	Alto
≥ 75	≥ 65	Muy Alto

Cálculo del Riesgo y re-evaluación anual

En el inicio de la implementación del PSA en el año 2012, la asignación de valores de probabilidad y gravedad para cada evento peligroso se realizó en una escala de 0 a 100. La asignación de los valores de probabilidad o gravedad se asignaron de acuerdo al criterio global y la experiencia de los participantes en un taller de expertos de la empresa. El riesgo, se calcula como el producto de la probabilidad y la gravedad establecido en forma porcentual. La utilización de la escala porcentual resulta más intuitiva y facilita la asignación de valores en la realización del taller.

Para cada evento peligroso se le asignó una medida de control. Por ejemplo, en los casos que se detecta ganadería y agricultura cercanos a una captación de agua, es necesario determinar si existen peligros de contaminación microbiológica y de pesticidas, y en caso positivo es necesario proceder a realizar una medida de control, tal como cercado de tomas, regulación de la actividad, establecer el lugar de captación como área restringida, tomar medidas ante lluvias intensas que pudiesen arrastrar contaminantes hacia la toma, etc. El cumplimiento de esas medidas de control se re-evaluaron anualmente mediante talleres internos dentro de la empresa, y se recalculó el valor del riesgo de acuerdo al cumplimiento de la medida de control correspondiente.

Revisión de las medidas de control. Riesgo virtual versus riesgo real

Las medidas de control implementadas por la empresa se revisaron para verificar su avance desde el año 2012 al 2016. Algunas medidas de control no impactan directamente sobre el servicio de agua. Son aquellas que, para poder disminuir el riesgo, requieren de gestiones previas ante entes externos o internos, por ejemplo, Ente Regulador de los Servicios Públicos (EnReSP), Municipalidades y/o diferentes organismos de la provincia de Salta. Estas gestiones fueron interpretadas por la empresa como indicadores de una disminución del riesgo. Es decir, que un riesgo X en el año 1, cuya medida de control es Y , dio lugar a un nuevo valor de riesgo en el año 2 igual a $X_{\text{año } 2} = X_{\text{año } 1} - Y$. Sin embargo, se detectó que esa medida de control, al no impactar directamente sobre el riesgo, no debe considerarse en el nuevo cálculo de riesgo, es decir que $X'_{\text{año } 2} = X_{\text{año } 1}$. Por otro lado, se detectaron medidas de control inviables, es decir, medidas que se consideran de importancia de llevar a cabo, pero que por la dimensión presupuestaria que implican no se concretaron en los 5 años del PSA ni se realizarán a corto plazo. Ejemplo de esta situación es el caso de la medida de control: “Construcción de una planta potabilizadora nueva”. Tanto los valores de riesgo producto de las medidas de control sin impacto real en el suministro de agua ($X'_{\text{año } 2}$), así como también aquellos calculados teniendo en cuenta medidas inviables se denominaron “riesgo virtual”. Se recalcularon los valores de riesgo, denominando a este nuevo valor de riesgo “riesgo real”.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante los 5 años desde la implementación del PSA (2012-2016) se reevaluaron los riesgos de acuerdo a la implementación de las medidas de control. En el presente estudio, se realizó un análisis de las medidas de control para determinar cuál de ellas da lugar a medidas de riesgo virtual. En la figura 2 se muestra el resultado del análisis para todos los sistemas (Figuras 2a), 2b y 2c) y un análisis global resultante de un promedio del riesgo teniendo en cuenta los tres sistemas superficiales (Figura 2d)). Se puede observar en todos los casos que el riesgo determinado por la empresa prestadora de servicio, es decir, lo que en este estudio se llama “riesgo virtual” se encuentra ligeramente por debajo del riesgo real. Es decir que si se tiene en cuenta que algunas medidas son inviables y que no deben considerarse para el cálculo del riesgo, y que además algunas medidas de control no impactan en el valor del riesgo, las medidas de riesgo reales son mayores. La diferencia observada se debe a distintas razones. En general, en los sistemas de origen superficial, la agricultura y ganadería son eventos peligrosos cuando se encuentran cercanos a los sistemas de captación y al sistema de transporte de agua cruda hacia las plantas potabilizadoras (aducción). Este fue uno de los problemas detectados en el año 2012. Con el fin de minimizar ese riesgo se establecieron ciertas medidas de control entre las que se destacan las gestiones y consenso de las medidas a tomar para minimizar impactos negativos. Entre las medidas acordadas se destacan la concientización de pequeños productores, reuniones para regular el ganado y la futura elaboración de reglamentaciones. Si bien las actividades de gestión son sumamente necesarias para concretar soluciones, en sí mismas no tienen un impacto sobre el riesgo asociado al sistema de provisión de agua, es decir, no logran una disminución del riesgo real. De manera análoga ocurre cuando una medida requiere la construcción de nueva infraestructura (construcción de cerco olímpico, construcción de defensas, etc), que hasta que no están ejecutadas en su totalidad no tienen efecto sobre el riesgo. Es este trabajo, se hace hincapié, en que la medida de riesgo virtual es necesaria para visualizar un avance en hacia la solución, pero no debe ser representada como una disminución del riesgo propiamente dicha. En la Figura 2c) se observa claramente como el riesgo virtual es un camino para alcanzar el riesgo real, dado que el año 2016 ambos valores se igualaron, es decir, en ese punto se concretó una de las medidas de control previamente establecida en el año 2012.

Asimismo, se detectaron medidas de control inviables. Una de ellas es la construcción de nuevas plantas potabilizadoras. En el caso del sistema N°2 se está procediendo a su ejecución en la actualidad, pero en los sistemas restantes no se realizará a corto plazo. Se considera que pueden ser necesarias en algunos casos ya que existen inconvenientes para hacer frente a problemas asociados al cambio climático, como ser lluvias intensas, inundaciones y sequías. Sin embargo, al no poder ser ejecutadas a corto plazo, su consideración dentro de los cálculos de riesgo no tiene sentido en sí mismo, ya que impide enfocar el problema hacia soluciones viables y una cierta inercia en el tiempo al no poder alcanzar el valor umbral de riesgo acordado.

Por otro lado, es necesario analizar los valores umbrales de riesgo y los rangos de clasificación de riesgos mostrados en la Tabla 1 y la Figura 2. Por un lado la empresa estableció un umbral de riesgo aceptable igual a 10, más exigente al establecido inicialmente. Asimismo considera como “muy altos” a los valores de riesgo mayores a 65, a diferencia del valor inicial que consideraba un umbral superior de 75. En la Figura 3 se muestran los valores de riesgo virtual correspondiente a los sub-procesos de potabilización y aducción del sistema N° 1. En el caso del proceso de aducción, puede observarse que se ha logrado llegar al umbral de valor aceptable de 24, pero no se logra cumplir con el valor umbral de 10. Esto puede llevar a seguir invirtiendo tiempo y dinero en concretar medidas para bajar el riesgo en lugar de priorizar otras. Asimismo, se observa que en el caso del proceso de potabilización, en ningún caso se llega al valor umbral de 75, pero si se excede el valor umbral de 65, considerando todos los riesgos como “muy altos” y ubicando la situación en un lugar mucho más grave del que realmente está. En este punto también hay que tener en cuenta que estos valores contienen las medidas inviables y por lo tanto, impide poner el foco en medidas que puedan ser viables de llevar a cabo. Se considera que al implementar un PSA por primera vez es recomendable que los niveles de exigencia sean leves y que luego de una reevaluación pueda elevarse el nivel de exigencia de los mismos, sobre todo en empresa de gran envergadura donde los procesos a controlar son variados y de una amplitud presupuestaria importante.

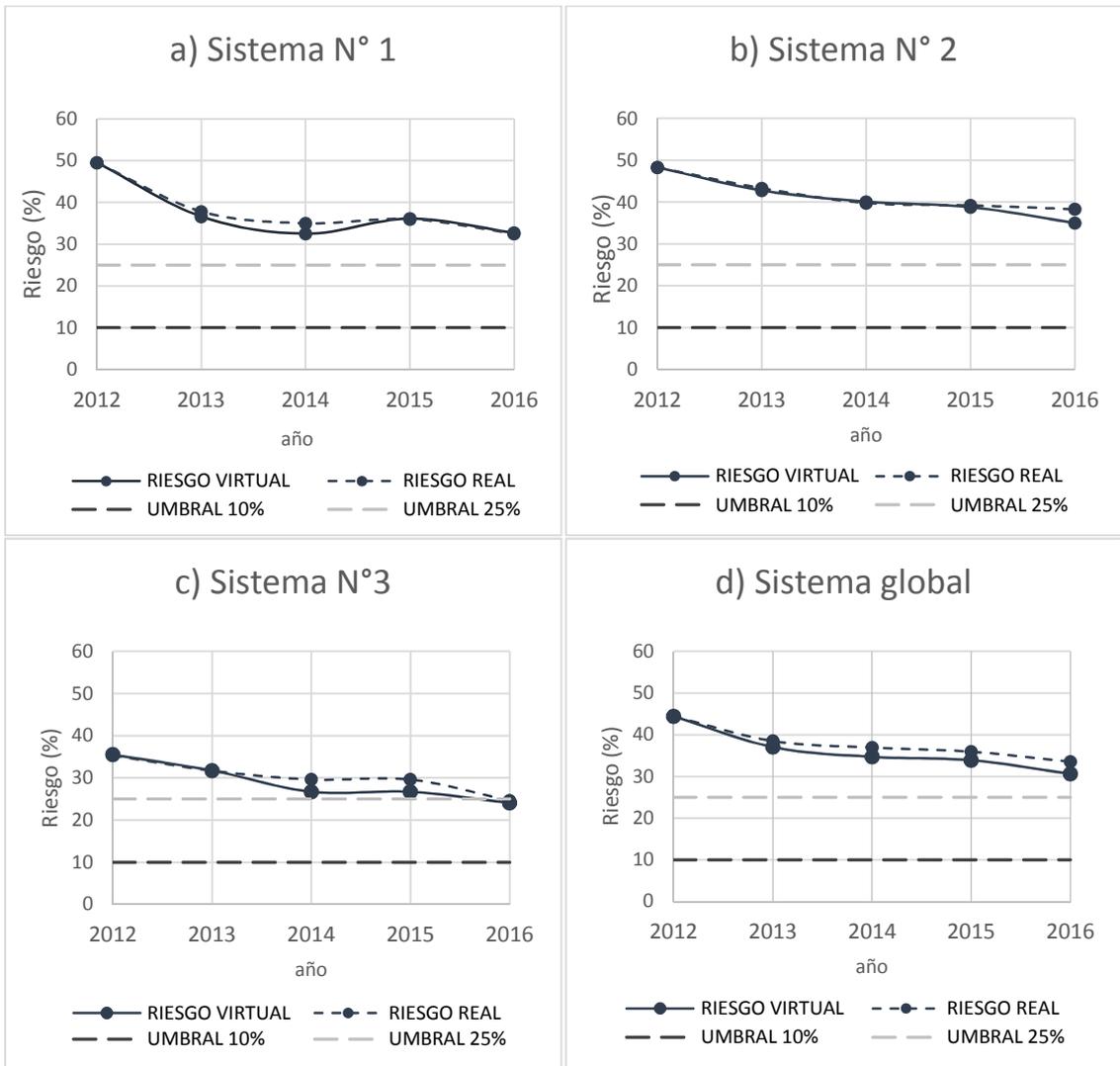


Figura 2. Riesgo virtual y Riesgo real para los 3 sistemas superficiales a), b) y c). La figura d) representa un promedio de los resultados de los 3 sistemas superficiales.

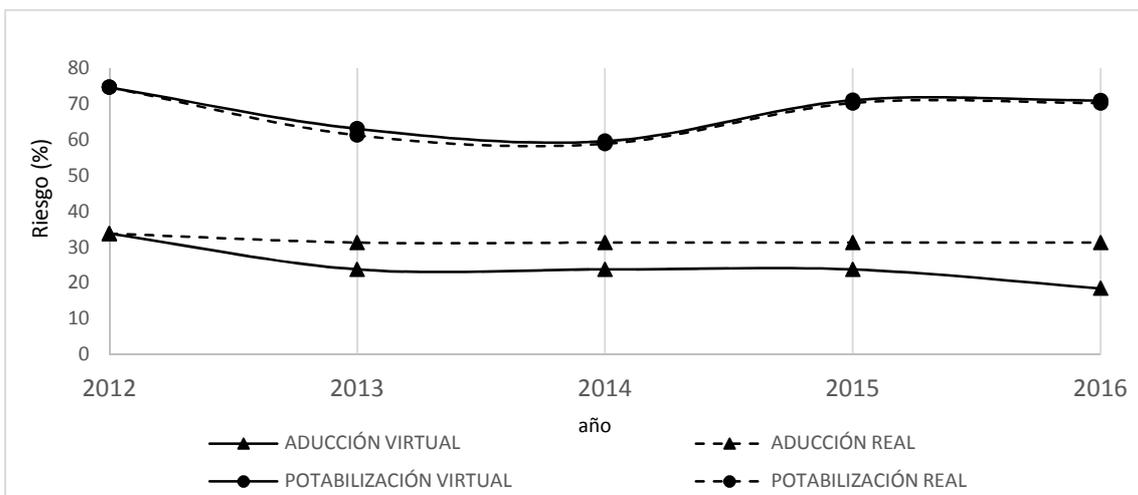


Figura 3. Riesgos virtual y real para los sub-procesos de aducción y potabilización del Sistema N° 1

CONCLUSIONES

Durante la re-evaluación de las medidas de control y valores de riesgo fue posible realizar una revisión exhaustiva de las causas de la evolución de los riesgos del PSA durante 5 años de implementación. La nueva definición de riesgos virtual y real permite una evaluación continua de la evolución del PSA y diferenciar aquellas medidas que tienen un impacto directo sobre la calidad del suministro de agua, de aquellas que se encuentran en gestión o ejecución pero que aún no han tenido un impacto real en la disminución del riesgo. Por su parte las medidas inviables deben replantearse para el seguimiento del PSA luego de los 5 años. Al no poder llevarse a cabo por cuestiones presupuestarias es necesario establecer medidas que estén al alcance a corto plazo y que den solución a la problemática que la medida inviable busca corregir. De no ser así tenemos un problema en el servicio que perdura a través de los años. Por otro lado se destaca el avance en medidas que no requieren de presupuesto elevado pero que tienen gran impacto sobre el servicio, como ser los servicios de vigilancia, cercado perimetral, seguridad en gabinetes de cloración, fuentes alternativas de energía en caso de cortes de luz, etc. Esto es importante de tener en cuenta al momento de re-evaluar un PSA y en el establecimiento de prioridades, ya que en general son las medidas que dan resultados a corto plazo y no requieren grandes inversiones de dinero.

El presente trabajo no se centra en la evaluación de la calidad del servicio sino en la evaluación de las medidas de control y los riesgos calculados. El análisis realizado hasta aquí forma parte de una re-evaluación que debe considerar el trabajo a campo por parte de un auditor externo que verifique el cumplimiento de las mismas y el registro de las prácticas llevadas a cabo ante eventualidades. Un valor de riesgo no tiene utilidad si no está acompañado de la validación. Por lo tanto, en una próxima etapa es necesario realizar la validación del PSA mediante el análisis de variables de control que permitan correlacionar los valores de riesgo con la calidad del servicio. Es posible que las variables como cloro residual, turbiedad y reclamos de los consumidores puedan servir como indicadores para la validación. Así será posible iniciar un proceso de mejora continua del PSA.

El PSA considerado en este estudio es particularmente complejo por la cantidad de sistemas y procesos puestos en juego. A través de la re-evaluación completa de este PSA será posible elaborar plantillas de cálculo de riesgo mejoradas y de mayor simplicidad para poder ser utilizadas por sistemas de mediana y gran envergadura y que, como en este caso, sean adaptables a las necesidades de la propia empresa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del área de Plan de Seguridad del Agua de la Compañía Salteña de Agua y Saneamiento (CoSAySa) quien lleva adelante el desarrollo del PSA que se inició en el marco de un convenio específico de colaboración firmado entre la Universidad Nacional de Salta (UNSa), el INENCO y CoSAySa vigente desde el año 2011.

REFERENCIAS

Abramovich B., Lurá M.C., Haye M.A., Gilli M.I., Vaira S., Contini L. (2000). Parásitos en aguas y su relación con indicadores químicos y microbianos de contaminación. XVIII Congreso Nacional del Agua. Santiago del Estero, Argentina.

Arias, M. y Bianchi, A.R. (1996). Estadísticas climatológicas de la Provincia de Salta. Dirección de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Provincia de Salta. Estación Experimental Agropecuaria Salta, INTA. 189 p.

Bartram, J., Corrales, L., Davison, A., Deere, D., Drury, D., Gordon, B., Howard, G., Rinehold, A. y Stevens, M. (2009). Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua. Metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo. Ginebra: OMS/IWA.

Bossel, H. (1999). Indicators for sustainable development: theory, method, applications. A report to the Balaton Group. International Institute for Sustainable Development (IISD). Winnipeg, Canada.

CAA (Código Alimentario Argentino) (2014). Capítulo XII, Bebidas hídricas, agua y agua gasificada. Disponible en http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp. Acceso junio 2018.

DGEPS (Dirección General de Estadísticas de la Provincia de Salta) (2016). Anuario Estadístico – Provincia de Salta. Año 2015 – Avance 2016. Gobierno de la Provincia de Salta. 1ra Edición, ISBN 978-987-45650-4-4, Salta.

Hrudey, S.E., Hrudey, E.J. (2004). Safe Drinking Water - Lessons Learned from Recent Outbreaks in Affluent Nations. IWA Publishing, London.

Rodriguez-Alvarez M.S., Moraña L.B., Salusso M.M., Seghezze L. (2017a). Caracterización espacial y estacional del agua de consumo proveniente de diversas fuentes en una localidad periurbana de Salta. Revista Argentina de Microbiología, 49(4):366-376.

Rodriguez Alvarez M.S., Fleitas A., Bonifacio J.L., Gatto D'Andrea M.L., Liberal V., Iribarnegaray M.A., Seghezze L. (2017b). Plan de Seguridad del Agua en Salta, Argentina: 5 años de experiencia. Water and Development Congress 2017. International Water Association. 13 al 17 de Noviembre de 2017. Buenos Aires, Argentina.

Seghezze, L., Gatto D'Andrea, M. L., Iribarnegaray, M. a., Liberal, V. I., Fleitas, A. y Bonifacio, J. L. (2013). Improved risk assessment and risk reduction strategies in the Water Safety Plan (WSP) of Salta, Argentina. Water Science and Technology: Water Supply, 13(4):1080-1089. doi:10.2166/ws.2013.087. Disponible en http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf. Acceso en febrero 2018.

WHO (World Health Organization) (2011). Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition. Disponible online http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf. Acceso febrero 2018.

WHO (2014). Water Safety in Distribution Systems. Disponible en http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204422/9789241548892_eng.pdf;jsessionid=2710EFFD3D51CCA095447C7C5683687A?sequence=1. Acceso julio 2018.

OMS (2017). Enfermedades diarreicas (Organizacion Mundial de la Salud) Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs330/es/> Acceso marzo 2018.

ABSTRACT: The objective of this paper is to carry out an evaluation of a Water Safety Plan (WSP) developed in the city of Salta, Argentina, with specific focus on the analysis of control measures and the calculation of risks in the period 2012-2016. The concepts of Virtual Risk and Real Risk are defined in order to clearly visualize which are the control measures that allow a concrete reduction of the risk of those that do not. A review of the risk thresholds and an analysis of their relevance to the development of a WSP was conducted. The results show that the real risk was always higher than virtual risk, and the threshold of the acceptable risk currently used is too high to be met at this stage. The results obtained are an indispensable part of a re-evaluation of a WSP, which then will be complemented by field verification and validation.

Keywords: re-evaluation, risk assessment, Salta, WSP.

BOSQUES POLÍTICOS: UN ESTUDIO DE LA HISTORIA AMBIENTAL DE SALTA FORESTAL S.A. EN EL PERIODO 1974-2017 DESDE EL ENFOQUE DE LA ECOLOGÍA POLÍTICA

C. Ortega Insaurralde¹, L.L. Huaranca², M.R. Montenegro³ y L. Seghezzo⁴

Grupo de Estudios e Investigaciones Socio-Ambientales (GEISA), Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Avda. Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina tel. +54-387-4255516 e-mail: lauralilianahuaranca@yahoo.com.ar

Recibido 15/08/18, aceptado 28/09/18

RESUMEN: La empresa pública Salta Forestal S.A. fue creada en el año 1974 en el departamento Anta de la provincia de Salta. Mediante un aprovechamiento “integral” y “racional” de los bosques, se pretendía suministrar carbón, durmientes y postes a empresas del Estado. Este trabajo examina desde el enfoque de la ecología política la historia ambiental de la empresa en el periodo 1974-2017. Se analizaron documentos escritos, entrevistas a actores sociales relevantes y mapas satelitales poniendo el foco en las relaciones de poder que operaron en la interfaz sociedad-naturaleza. El análisis muestra que Salta Forestal, basada en una ideología eco-modernizadora y en un discurso de desarrollo sustentable, transformó su territorio en un ‘bosque político’ caracterizado por conflictos socio-ambientales y una profundización de la degradación ambiental. Se concluye que los resultados negativos de la empresa en términos socio-ambientales estaban inscritos en la lógica de las ideas que justificaron su creación.

Palabras claves: Salta Forestal, ecología política, historia ambiental y sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, en la región del chaco salteño se implementaron diversas formas de explotación de los recursos ambientales (Paruelo et al., 2011) que fueron acompañadas por conflictos sociales. Estos cambios de uso y cobertura del suelo fueron motivados por intereses económicos, observándose un rápido avance de la frontera agropecuaria para la producción capitalista agrícola y ganadera. Por estas razones, Salta en general, y su área sudeste en particular, es un laboratorio apto para investigar no solo las dinámicas de los procesos históricos de conversión del uso de la tierra en sus bosques y montes, sino también las consecuencias sociales y económicas de la degradación ambiental (Seghezzo et al., 2011).

La empresa estatal Salta Forestal S.A., ubicada en el departamento Anta de la provincia de Salta, es un caso paradigmático de cambio del uso y cobertura del suelo y de conflicto por tenencia de la tierra (Schmidt, 2017). Salta Forestal S.A. fue creada en el año 1974, durante el gobierno de Miguel Ragone, a través de la conversión de los lotes fiscales 35 y 36 a cargo del Estado provincial en asociación con la Dirección General de Fabricaciones Militares (DGFM). El objetivo del emprendimiento era el “aprovechamiento integral del bosque, de acuerdo con moderna tecnología y requerimientos silvícolas del área y normas que fijen los organismos técnicos competentes, la explotación, carbonización,

¹ Estudiante de la Facultad de Humanidades, Universidad Nacional de Salta (UNSa)

² Becaria Doctoral del CONICET, INENCO

³ Técnica de apoyo del INTA-Joaquín V. González

⁴ Investigador Independiente del CONICET, INENCO

industrialización, forestación y comercialización de productos y subproductos forestales y agropecuarios en general” (Ley 4981/74). Su producción estaba concentrada en carbón vegetal para la empresa siderúrgica estatal Altos Hornos Zapla, en un contexto de políticas públicas orientadas al desarrollo de una estructura industrial integrada y al autoabastecimiento de bienes intermedios (Liaudat, 2008).

En los lotes fiscales en los que se constituyó Salta Forestal habitaban familias criollas de ascendencia europea. Los criollos han poblado la provincia de Salta desde tiempos coloniales, pero han intensificado su presencia al final del siglo XIX (Gordillo y Leguizamón, 2002). La subsistencia de los criollos depende de la ganadería de monte, una práctica productiva que ha ido variando en el tiempo y que posee un fuerte componente cultural (Michaud y Mónico, 2008). La ganadería de monte es extensiva, es decir que los animales pastan libremente en el monte alrededor del “puesto” en tierras estatales o privadas sin explotar. En Salta Forestal, los conflictos por tenencia de la tierra, producidos por la concentración de la posesión territorial en cada vez menos actores, se acoplan a la deforestación y afectan a la población criolla que depende exclusivamente de la integridad del bosque (Jeckeln et al., 2016). Por otra parte, la vulnerabilidad de los pequeños productores criollos aumenta ya que no poseen instrumentos legales específicos, por lo que en su calidad de ‘poseedores’, las únicas herramientas jurídicas para defender su derecho a la propiedad ante los intentos de desalojo a los que son sometidos y presionados, son los juicios de usucapión o prescripción “veinteañal”.

La historia ambiental es una disciplina híbrida que permite realizar indagaciones sobre procesos de cambios socio-ambientales analizados en retrospectiva, de manera de imbricar lo natural con lo cultural en las descripciones, explicaciones y narrativas históricas (Zarrilli, 2014; Ruuskanen y Väyrynen, 2017). La ecología política también contribuye enfocarse en las relaciones de poder en torno a los recursos ambientales para comprender las relaciones complejas entre la sociedad y la naturaleza (Watts, 2008). Al concentrarse en “ambientes politizados” (Bryant y Bailey, 1997:26) representa una alternativa explícita a las “ecologías apolíticas” (Robbins, 2012). Esto implica combinar las preocupaciones de la ecología y de una economía política definida de manera amplia (Blaikie y Brookfield, 1987), con una mirada crítica a los procesos desiguales a través de los cuales los problemas ambientales son construidos social y discursivamente (Kallis, 2008:114). En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar el proceso de cambio socio-ambiental desencadenado en el territorio de la empresa Salta Forestal a partir de su creación, reconstruyendo el contexto, configurado por relaciones de poder específicas, que da inteligibilidad a las prácticas de los actores en la interfaz sociedad-naturaleza y al modo en que estos construyeron discursivamente el proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio fue delimitada en los lotes fiscales (números 35 y 36) que constituyen la empresa pública Salta forestal S.A. Estos poseen, en conjunto, una superficie de 338.331 ha y se encuentran ubicados entre los 24° y 25° Latitud Sur y 63° y 64° Longitud Oeste a 37 km de Joaquín V. González, con acceso por rutas provinciales 41 y 52 (Figura 1), departamento Anta de la provincia de Salta (Ortín y Godoy, 1999). El área es parte de la zona agroeconómica del Chaco Semiárido con Ganadería y Forestales (Piccolo et al., 2008). El clima es subtropical semiárido con lluvias de tipo monzónico concentradas de noviembre a abril de 550 a 600 mm. La vegetación se caracteriza por la presencia de bosques xerófilos y caducifolios, adaptados al déficit hídrico y de importancia económica y valor cultural. Entre las principales especies puede mencionar el quebracho colorado (*Schinopsis quebracho colorado*) y quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*) en el estrato superior; mistol (*Ziziphus mistol*), guayacán (*Caesalpinia paraguariensis*), vinal (*Prosopis ruscifolia*) en el estrato medio y algarrobo blanco y negro (*Prosopis alba* y *nigra*) y chañar (*Geoffroea decorticans*) en las zonas bajas (Cabrera, 1976), sotobosque abundante con predominancia de garabato (*Acacia praecox*), duraznillo (*Ruprechtia triflora*), teatín (*Acacia furcatispina*) y distintas especies del género *Capparis*. Sin embargo, en las últimas décadas se han producido extensos desmontes para agricultura y ganadería de tipo empresarial (Volante et al., 2006; Gasparri y Grau, 2009), impulsadas por la revolución verde, incentivos políticos y el aumento de la demanda internacional de alimentos. La ganadería de monte realizada en el área de estudio, también ejerció modificaciones en la vegetación (Saravia Toledo,

1997). La fauna presenta un componente importante en la cultura de la población criolla ya que constituye fuentes de alimento (quirquincho, pava del monte, entre otros), pero también una amenaza (yaguareté y puma) para la producción ganadera. Estas especies a su vez se encuentran amenazadas de extinción por la reducción de la biodiversidad provocada por los cambios de uso y cobertura del suelo (Paruelo et al., 2005).

Historia ambiental y Ecología política

El estudio se realizó desde la perspectiva de la ecología política. Se analizaron fuentes escritas, orales y visuales que brindan información sobre la historia ambiental de Salta Forestal. Esta perspectiva implica subrayar las dimensiones sociopolíticas del bosque, pero sin descuidar sus aspectos ecológicos. El periodo de estudio comprendido es a partir del año 1974, año de la creación de la empresa, al año 2017, un año después de los diagnósticos de sustentabilidad realizados en el área de estudio (Jeckeln et al., 2016; Huaranca et al., 2017).

La descripción de la historia ambiental de Salta Forestal durante el período de estudio se basó en la búsqueda, análisis e interpretación de documentos escritos y en la realización de entrevistas profundas a actores claves. Las preguntas de las entrevistas y la selección de entrevistados claves, fueron guiadas por los Aspectos identificados en el Índice de Sustentabilidad Agropecuaria (ISAP) (Jeckeln et al., 2016; Huaranca et al., 2017), pero reformulados desde una perspectiva histórica. El número de entrevistas se determinó a través de la estrategia del muestreo teórico, según la cual “lo importante es el potencial de cada caso para ayudar al investigador en el desarrollo de comprensiones teóricas sobre el área estudiada de la vida social” (Taylor y Bogdan, 1992:108).

Se realizó una combinación entre la información provista y mapas satelitales, esto ayudó a clarificar, en una primera instancia, los puestos ganaderos presentes a lo largo del periodo de estudio y, en segunda instancia, los cambios ambientales. El análisis de mapas satelitales consistió en extraer imágenes, sin nubosidad, para el año 1975 y 2010 a partir de Landsat 2 y 7 respectivamente. Luego se calculó el Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI, por su sigla en inglés) para esas imágenes ya que representa un indicador de la salud vegetal y permite evaluar los procesos de degradación ambiental. Para el cálculo del NDVI se utilizaron las bandas correspondientes a la porción del rojo (IR, 620-670 nm) y del infrarrojo cercano (IRc, 841-876 nm) del espectro electromagnético, de acuerdo a la siguiente relación:

$$NDVI = (IR - IRc) / (IR + IRc)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las fuentes escritas, orales y visuales, se determinó la historia ambiental de Salta Forestal en tres periodos fijos:

Periodo 1974-1982

Los censos de población y productivos de 1960 indican la existencia en Salta de una estructura económico-social definida como capitalismo de economía privada con peso del campo, cuyas tendencias son la disminución de la población rural dispersa, la concentración de la propiedad de la tierra y la expansión de las relaciones capitalistas de producción en el campo (Soler y Abrahan, 2011). El sudeste de Salta, particularmente, fue caracterizado en esa época como un área predominantemente ganadero-forestal, con bosques agotados por el mal manejo, un pequeño núcleo de productores agrícolas y una población estable con desarrollo urbano latente (León et al., 1985:405). En este contexto fue creada Salta Forestal S.A., a través de la Ley Provincial N° 4.981 del año 1974, previa modificación de la Ley Nacional N° 13.273 que limitaba las concesiones forestales en tierras públicas, a pedido de las empresas del Estado Fabricaciones Militares y Ferrocarriles Argentinos, las cuales solicitaban a las provincias programas para aumentar la producción forestal (Saravia Toledo, 1997). La ley se sancionó durante el gobierno de Miguel Ragone, cuya política también estaba en consonancia con la idea de expandir los servicios del Estado de bienestar y fomentar la

industrialización (Servetto, 2010), pero su ejecución comenzó recién luego de la intervención federal de fines de 1974. A través de la mencionada ley, los lotes fiscales 35 y 36 del departamento Anta fueron transformados en empresa del Estado Provincial, que entregaba como aporte de capital no dinerario 338.331 ha de tierras fiscales, en asociación con la Dirección General de Fabricaciones Militares (DGFM), que debía aportar el capital dinerario.

Frente al proceso de desertización ambiental por acción antrópica a causa de la explotación pastoril y forestal (Saravia Toledo, 1997), el objetivo de la empresa era “el aprovechamiento integral de bosques, de acuerdo con moderna tecnología y requerimientos silvícolas del área y normas que fijen los organismos técnicos competentes, la explotación, carbonización, industrialización, forestación y comercialización de productos y subproductos forestales y agropecuarios en general” (Ley 4981/74). Su producción estaba concentrada en carbón vegetal para el emprendimiento siderúrgico estatal Altos Hornos Zapla, en Palpalá, provincia de Jujuy, dependiente de la DGFM y de Ferrocarriles Argentinos, y también, en menor medida, en la producción de durmientes y postes. El proyecto de Salta Forestal estuvo posibilitado por un contexto de políticas públicas de promoción del autoabastecimiento siderúrgico durante la década de 1970, en particular bajo el tercer gobierno peronista (Liaudat, 2008), es decir, en la etapa que se conoce como de “canto de cisne” del Estado Empresario Argentino (Rougier y Odisio, 2010). Puesta en funciones en el terreno el 7 de mayo de 1975, al iniciar sus actividades se alambraron 30.000 ha para la regeneración forestal y se constituyó un “Centro de Investigaciones Ecológicas” con parcelas de experimentación de sistemas de manejo y aprovechamiento (Saravia Toledo, 1997). Esto implicó una primera ola de expulsiones y reubicaciones de puesteros criollos y su ganado con la intención de evitar el sobrepastoreo. Luego se instalaron las baterías de hornos para la producción de carbón, con unidades de aprovechamiento de 900 ha. También se instalaron un aserradero y una carpintería (Gil, s/f). Además se constituyó el Centro 25 de Junio, núcleo poblacional y administrativo de la empresa. Una parte importante de la población dispersa en el predio es reubicada en este centro y tomada como mano de obra para las actividades de la empresa. En diciembre de 1975 la producción de la empresa alcanzaba la marca de 1500 tn de carbón por mes (Saravia Toledo, 1997). En este primer periodo se proyectaba aplicar un plan de corta, diseñado por Saravia Toledo, que permitía la “liquidación ordenada del bosque explotable” a través de un sistema de turnos de acceso a los distintos sectores (Ortín y Godoy, 1999).

Periodo 1982-1998

En gran medida por la crisis económica desencadenada por lo que se conoce como “Rodrigazo” (Rapoport, 2010), la DGFM invirtió menos del 30% del capital acordado, generando una carga financiera elevada que se cubría con deudas tanto con la misma DGFM como con el Banco Provincial (Ortín y Godoy, 1999). La DGFM controlaba a la vez toda la cadena de comercialización de la producción, estableciendo un mercado cautivo (Saravia Toledo, 1997). Esta situación crítica en términos financieros, sumada a que en 1982 la política de privatización periférica de la dictadura militar de 1976-1983 debilitó a la DGFM y suprimió el fondo siderúrgico (Justiniano y Oieni, 2010), condujo al Estado provincial, durante el gobierno de Roberto Ulloa (1978-1983), a adquirir la totalidad del capital accionario de la empresa y a constituir la Sociedad del Estado Salta Forestal S.A., tomando a su cargo los pasivos generados desde la creación de la empresa (Ley 5857/82; Ley 5949/82). Ahora la empresa podía comercializar libremente el carbón.

En 1983 la UNESCO realizó una evaluación positiva de la “Ecología Humana” de Salta Forestal por el hecho de estar orientada a “la recuperación del equilibrio ecológico, reducir la erosión del suelo, mantener la flora y la fauna, y asegurar la producción forestal y ganadera sobre bases sustentables” (Saravia Toledo, 1997). A partir de la provincialización de la empresa, los planes de “manejo ordenado” del bosque proyectados fueron abandonados. Se ingresó al Sector I antes del turno de corta, lo que generó daños importantes al recurso forestal. Incluso se permitió el reingreso del ganado en ese sector. También se habilitaron los restantes sectores para la explotación forestal. Por otro lado, la planta de empleados creció hasta llegar a los 607, mientras que la producción caía un 50% y se cerraba el aserradero. Este periodo, marcado por los años 1982-1993, estuvo caracterizado por irregularidades administrativas, endeudamientos y por la tala descontrolada del bosque (Saravia Toledo, 1997; Ortín y Godoy, 1999). Estas irregularidades y endeudamientos se acoplaron a la profundización en la década de 1990 de las políticas económicas rentístico-financieras conocidas como “neoliberalismo”

(Rapoport, 2010), que combinadas con las sucesivas crisis sistémicas del capitalismo global provocaron una crisis de las economías regionales debido a la apertura de los mercados y a la eliminación de los incentivos estatales (Barsky y Gelman, 2001). En este contexto, en 1991 el decreto de Necesidad y Urgencia 450/91 abortó la participación del Estado provincial en las actividades de la empresa, cerrándola de hecho. Desde 1993 la empresa se encontraba, de acuerdo a lo previsto en la Ley 6583 de Reforma Administrativa del Estado y Emergencia Económica, sujeta a privatización (Ley 6727/93). Un año antes, en 1992, no obstante, la empresa fue activada nuevamente para producir carbón y postes bajo la modalidad de contratistas que empleaban a trabajadores de los alrededores, situación que se iba a mantener hasta 1997, cuando se eliminan definitivamente los contratos (Ortín y Godoy, 1999).

Periodo 1998-2017

Durante la gobernación de Juan Carlos Romero (1995-2007) y a través de un proceso licitatorio convocado en 1998 (Ministerio de la Producción y el Empleo, Resolución 506/98.), en el que solo se presentó la firma Ecodesarrollo S.A., conformada por Olmedo Agropecuaria S.A. y Agropecuaria Cervera S.A., se concedió la explotación de 219.000 ha a 35 años con opción a 15 años más, y las 120.000 ha restantes por 35 años con opción a 29 años más (Ministerio de la Producción y el Empleo, resoluciones 188/99 y 190/99). Los contratos de concesión se firmaron en el año 2000 (Ministerio de la Producción y el Empleo, resoluciones 188/99 y 190/99). El plan original incluía actividades agrícolas (particularmente soja y otras legumbres), ganaderas, forestales y de ecoturismo (Saravia Toledo, 1997). Se estableció el pago de un canon a partir del año 20 de la concesión. Esta concesión es notoria por su magnitud y por sus irregularidades (Colina et al., 2012). En 2003, la empresa Ecodesarrollo Salta S.A. se dividió: Agropecuaria Cervera S.A. (luego Cresud SACIF) se quedó con 132.000 ha, mientras que Olmedo Agropecuaria lo hizo con la superficie restante (Schmidt, 2017). Es en este periodo, el de la privatización de la empresa, en que es posible observar de forma más clara el proceso de cambio del uso y de la cobertura del suelo, dado que las nuevas actividades que se comenzaron a desarrollar, especialmente la siembra directa de soja y la ganadería a gran escala, implicaron una mayor deforestación, en consonancia con la tendencia general hacia la reducción del bosque nativo en el Chaco salteño (Paruelo et al., 2011).

En 2008, a instancias de la recientemente creada Unidad de Revisión y Renegociación (Uniren), la provincia firmó un contrato con Cresud que establecía la devolución de 30.000 ha y el pago de un canon anual. Olmedo Agropecuaria se negó a participar de esta negociación (Página/12, 14/02/11). Más adelante, en 2011, la Auditoría General de la Provincia de Salta realizó una auditoría por solicitud del poder legislativo provincial. Las conclusiones principales del informe fueron que no se realizaron las auditorías ambientales periódicas establecidas en el pliego de bases y condiciones de la licitación; que se re-direccionaron inversiones de unos rubros a otros, incumpliendo lo pactado en el contrato (por ejemplo, se sub-invirtió en rubros relacionados con la forestación); que durante el periodo auditado las relaciones entre las empresas concesionarias y los puesteros fue altamente conflictiva: al menos 200 familias fueron expulsadas, según una inspección del Ministerio de Trabajo, a la vez que se prohibió que el ganado de los puesteros ingrese en los predios que formaban parte de la concesión (Página/12, 14/02/11); las empresas concesionarias prácticamente no realizaron obras de infraestructura; finalmente, no se avanzó con las obligaciones relacionadas con el proyecto de ecoturismo (Expediente 242-1872/08). Posteriormente, 30.000 ha habían sido desmontadas para sembrar soja. A medida que avanza el desmonte, la presión sobre los ocupantes tradicionales del territorio agrava la situación de acorralamiento y expulsión (Colina et al., 2012). A partir de estos resultados, en ese mismo año el gobierno provincial promovió un juicio de lesividad contra la empresa Ecodesarrollo (Expediente 5075/11). Por esta acción legal, la Fiscalía de Estado solicitó al Poder Ejecutivo que autorice celebrar un acuerdo transaccional. Este acuerdo, firmado en 2017, permitió a la provincia recuperar 81.819 ha y comenzar a cobrar el canon establecido del 10% del valor de la producción anual (Expediente 5075/11). Estas hectáreas recuperadas comenzaron a ser administradas nuevamente por Salta Forestal S.A. hasta la actualidad.

Gobierno Provincial	Gobierno Nacional				Año 2003			Año 2007						
	Legislación													
Eventos del territorio	Decreto de Proclamación de la Independencia													
	Decreto de Proclamación de la Independencia													
Eventos	Decreto de Proclamación de la Independencia													
	Decreto de Proclamación de la Independencia													
Años	1974	1978	1982	1983	1991	1992	1993	1998	2000	2003	2007	2008	2011	2017

Figura 1. Línea de tiempo con los principales datos y eventos relacionados a la empresa Salta Forestal a lo largo del periodo de estudio. Elaboración propia.

Ecología política de Salta Forestal

La descripción histórico-ambiental de la empresa y las entrevistas realizadas a puesteros, ex empleado y al ingeniero agrónomo Carlos Saravia Toledo responsable del proyecto de Salta Forestal, permitió realizar un análisis desde el enfoque de la ecología política. La creación de Salta Forestal produjo la reubicación, en algunos casos, y la expulsión, en otros, de pequeños productores ganaderos. El inicio de las actividades de la empresa implicó la presencia de funcionarios estatales y administradores que ejercían el control del bosque y una presión sobre los pobladores locales, quienes no contaban con la tenencia jurídica de la tierra. En etapas subsiguientes, particularmente a partir de la privatización, los conflictos socio-ambientales en general, y por la tenencia de la tierra en especial, se profundizaron, dada la aparición en el área de nuevos actores sociales vinculados a empresas ganaderas y agrícolas capitalistas, con gran poder e influencia. Este proceso local, combinado con otros de nivel regional y global (Teubal, 2001), también generó una transformación de la ganadería de monte, que pasó de ser una actividad de subsistencia a otra vinculada al mercado, propiciando una racionalidad económica en los criollos, aunque siempre en tensión con determinaciones de orden cultural. Estos procesos determinaron que el territorio de Salta Forestal se haya transformado efectivamente en un ‘bosque político’ (Vandergeest y Peluso, 2015).

El análisis de la memoria social de los puesteros arroja resultados transversales y otros ambivalentes. Uno de los discursos comunes que aparece en casi todos los casos y que daba cuenta de la presencia de los puesteros y del carácter precario de la tenencia de la tierra, era el relacionado con el “derecho de pastaje” el cual fue aplicado desde la creación de Salta Forestal hasta aproximadamente principios de la década de 1990, y también el pago de un canon en especie de utilizar el bosque para sus actividades productivas. Algunos entrevistados afirman incluso que durante las primeras etapas de la empresa, el control sobre las actividades que implicaban una modificación del bosque era bastante estricto. Uno de los entrevistados, por ejemplo, afirma que había periodos en el cual la empresa prohibía la tala de quebrachos. Otro de los discursos comunes es el referido a los cambios ambientales: 1) el clima: todos los entrevistados sostienen que perciben una reducción considerable en las lluvias, por lo que disminuye a su vez el alimento disponible para el ganado, 2) la vegetación: fue recurrente el señalamiento de la baja calidad, cantidad y el tamaño de los especímenes de quebracho, 3) la fauna: todos los entrevistados señalan la reducción considerable de las especies que tradicionalmente eran cazadas para consumo, particularmente el conejo de los palos y el quirquincho, también es significativa la virtual desaparición del yagareté, conocido en la zona como “tigre”, uno de los puesteros afirma haber cazado el último tigre de la zona hace 25 años. Estas construcciones discursivas comunes de los entrevistados pueden interpretarse como percepciones negativas frente al proceso histórico-ambiental desencadenado por la creación de Salta Forestal. Pero estos elementos se encuentran, en algunos casos, en tensión con otras afirmaciones que valoran la instalación de la empresa de manera positiva. Esto es particularmente marcado en el caso de los puesteros que trabajaron en ella; uno de ellos afirma haber trabajado como hachero durante el periodo 1993-2000, es

decir, en el periodo en que se aplicaba la modalidad de contratistas. En otros casos, se valoran positivamente la creación del Centro 25 de Junio y algunas mejoras de infraestructura que fueron implementadas en mayor medida durante la primera etapa de la empresa. No obstante esta ambivalencia, el elemento discursivo que aparece de modo constante es el referido a la incertidumbre por las condiciones precarias de tenencia de la tierra, problemática que en las últimas décadas se agudiza a medida que avanza la frontera agropecuaria y con ella la deforestación (Figura 2).

El ex-empleado, por otra parte, plantea un panorama con aspectos positivos y negativos de la empresa. Como aspecto positivo expone, en primer lugar, la creación de fuentes de trabajo para los pobladores de la zona, la creación del “Centro Administrativo-Industrial-Poblacional 25 de Junio” con todos los servicios básicos asociados (centro sanitario, destacamento policial, edificio escolar, reacondicionamiento de rutas, transporte urbano) y la exportación de materia prima (quebracho colorado y quebracho blanco, entre otras especies). En cuanto a aspectos negativos, manifiesta que durante el periodo 1982-1993 hubo bastante corrupción y baja eficiencia productiva, generando caídas en las ganancias económico-financieras y repercutiendo en los empleados de Salta Forestal, llegando desafortunadamente al cierre de la empresa. Esto provocó un sentimiento amargo del ex-empleado, “(...) me duele manifestar que a esta empresa la he visto nacer, crecer y morir”. También suma a lo anterior la pérdida de calidad ecosistémica del área de estudio. Finalmente, atribuye en reiteradas ocasiones que el futuro de la empresa depende única y exclusivamente de las autoridades del Estado.

Las investigaciones previas del ingeniero agrónomo Carlos Saravia Toledo fueron fundamentales para el proyecto de Salta Forestal. A través de la entrevista, se pudo reconstruir el contexto de producción del proyecto. Saravia Toledo nació en el departamento Anta, teniendo un temprano contacto con la flora y la fauna del Chaco semiárido. El ingeniero sostiene hasta el día de hoy, que la ganadería de monte, extensiva y de subsistencia, evitaba la regeneración de la flora, especialmente de quebracho colorado, debido al sobrepastoreo conduciendo a la desertización del suelo. Frente a este diagnóstico, y ante la necesidad de carbón vegetal para la producción siderúrgica, era necesario, según Saravia Toledo, un emprendimiento estatal que se concentre en el manejo racional e integrado del bosque. El análisis de la entrevista al ingeniero refleja además que desde su perspectiva el objetivo ulterior del proyecto no era tanto la conservación del bosque sino el de establecer “pueblos permanentes”. Esta idea fue apoyada a partir de una estancia de investigación que realizó en la Universidad de Arizona (ASU) en Estados Unidos, en donde los bosques eran propiedad del Estado y servían de base a los pueblos del interior. Esto lo llevó a proyectar un emprendimiento forestal “sustentable” que permitiese la población del campo. En última instancia, no era el bosque en sí lo que había que proteger, sino los productos y servicios que este podía proveer a los pueblos para su desarrollo. Según Saravia Toledo, por otro lado, la evolución de la empresa estuvo determinada por la injerencia política, entendida de un modo despectivo y opuesto a la educación, obligación en la que el Estado debe priorizar.

En 1997 Saravia Toledo publicó un informe sobre el balance de la evolución de Salta Forestal S.A. a pedido de la empresa Ecodesarrollo Salta S.A. Entre los aspectos negativos señala que la DGFM aportó sólo el 30% del capital acordado y que manipuló los cupos y precios de la producción en perjuicio de la empresa, a través del monopolio de la cadena de comercialización; que luego de 1982 la inflación, los gastos injustificados, la contratación masiva de empleados y la desorganización generalizada en el manejo de los recursos forestales contribuyeron a generar un endeudamiento elevado y crisis financieras recurrentes. En cuanto los aspectos positivos, Saravia Toledo resalta la ejecución de un sistema de manejo forestal “eficiente y sustentable” que propició la regeneración, la creación de núcleos poblacionales, la constitución de un centro de investigaciones ecológicas, la construcción de infraestructuras básicas (edificios, caminos, alambrados, pozos, etc.) y el establecimiento de un ordenamiento territorial racional (Saravia Toledo, 1997). En suma, más allá de sus aspectos negativos, para Saravia Toledo la experiencia de Salta Forestal demostró la posibilidad de un “desarrollo sustentable” en el Chaco semiárido salteño.

La idea de “desarrollo sustentable”, tal como fue presentada originalmente en el Informe Brutland (1987), está vinculada a una ideología eco-modernizadora donde el crecimiento económico es la solución a la pobreza y a la degradación ambiental, con claras tendencias antropocentristas y tecnocentristas (Seghezzi, 2009). Desde este punto de vista, el desarrollo económico no sería

incompatible con la conservación ambiental, si se aplican soluciones eficientes en términos económicos. De hecho varios autores suponen que la eficiencia económica conlleva resultados ambientales positivos (Robbins, 2012). Estas ideas han estado en circulación y han respaldado políticas y discursos públicos desde la década de 1970 a nivel global (Schmidt, 2017).

La ideología eco-modernizadora también se pudo observar en el proyecto Ecodesarrollo Salta S.A., elaborado, al igual que el proyecto original de la empresa estatal, por el ingeniero Saravia Toledo (1997). Es decir que desde el punto de vista ideológico estamos frente a una continuidad entre el proyecto estatal y el proyecto privado. En ambos casos se desplegaron narrativas históricas basadas en investigaciones científicas sobre el rol de la acción antrópica en la degradación ambiental, justificando una intervención, estatal primero y privada después, con el objetivo de implementar técnicas modernas, racionales e integrales de los recursos forestales. De este modo se legitimó la reubicación y expulsión de los pobladores tradicionales a partir de argumentos ecológicos que ponía en cuestión sus prácticas culturales “irracionales”. Esta instrumentalización de la ciencia ecológica en la justificación de discursos y políticas públicas problematiza la distinción positivista entre ciencia y política.

Los problemas que manifiesta esta ideología son: a) que la tecnología moderna y la mercantilización de la naturaleza pueden optimizar la producción y hacerla sustentable es históricamente cuestionable; b) la idea de que en el Norte global se produce un conocimiento ambiental superior reproduce las relaciones paternalistas coloniales basadas en un esquema moderno-primitivo, negando a priori las prácticas culturales de las poblaciones tradicionales indígenas y criollas; c) el control monopólico de los recursos, por un lado, y la inestabilidad de los mercados, por otro, ha conducido generalmente a la degradación del suelo y conflictos sociales en los países del Sur global (Robbins, 2012).

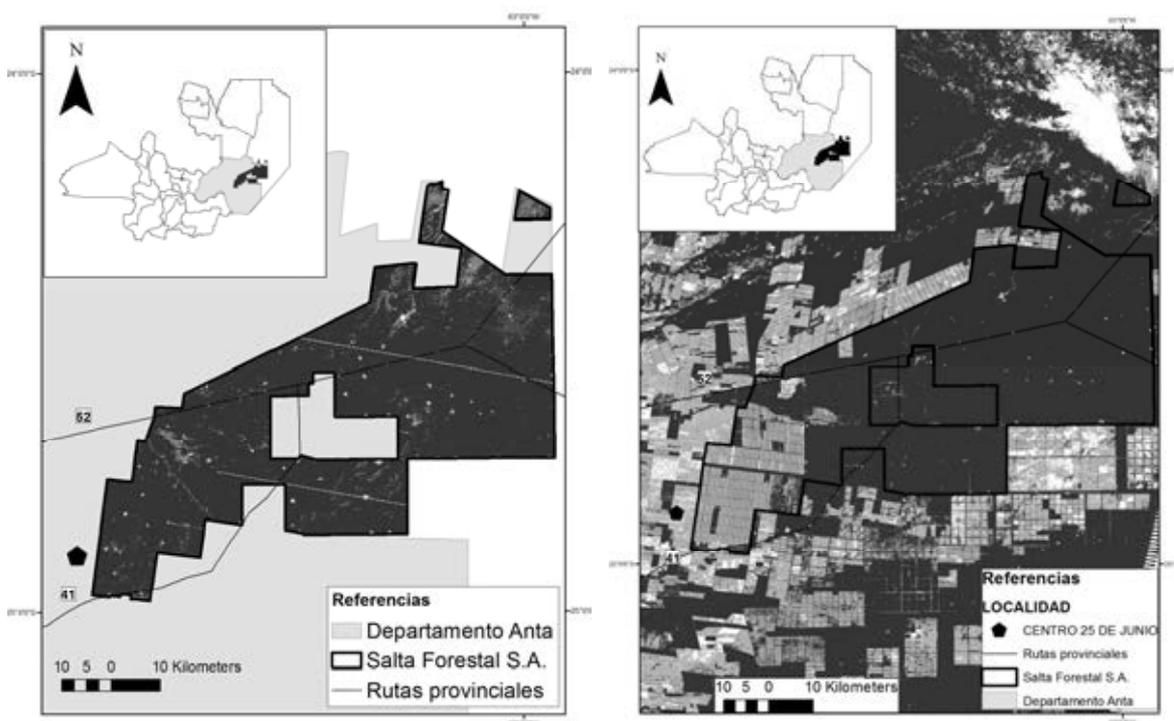


Figura 2. NDVI del área de estudio del año 1975 (izquierda) y 2010 (derecha). Tonalidades de negro a blanco indican valores decrecientes de NDVI

Desde el momento de la creación de Salta Forestal, los cambios no sólo causaron una disrupción del entramado social, como se detalló anteriormente, sino se pudo comprobar que también se profundizó la degradación ambiental. En la *Figura 2* se observan caídas abruptas del NDVI, tanto en el área de estudio como en áreas circundantes. El proceso de cambio de uso del suelo sujeto al incremento de superficie agrícola a expensas de bosques nativos se intensificó de manera exponencial durante la privatización de la empresa y continúa de manera acelerada. El reemplazo de ecosistemas nativos por

cultivos anuales produce cambios estructurales y funcionales que inciden en procesos a nivel de paisaje, como las ganancias de carbono y dinámica del agua, y conducen a la pérdida de biodiversidad y a la reducción de la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos (Paruelo et al., 2005). Esto, sumado al bajo impacto de la “Ley de Bosques” (Volante y Seghezzeo, 2018) conduce a la insustentabilidad del área de estudio.

CONCLUSIONES

Los abordajes teóricos de la historia ambiental y de la ecología política han sido fructíferos al momento de entender y analizar el proceso de cambio socio-ambiental iniciado con la creación de Salta Forestal. A partir del inicio de Salta Forestal se desencadenó un cambio del uso y la cobertura del suelo que configuró un proceso histórico-ambiental con distintas etapas en las cuales se vieron afectados de manera negativa los habitantes tradicionales, la flora y la fauna del lugar. Entender la dinámica de este proceso implica poner el foco en las relaciones de poder desplegadas en la interfaz sociedad-naturaleza. Las tesis ecológicas o ambientales sobre la desertización antrópica fueron informadas por una ideología eco-modernizadora, operando como legitimación de la creación de la empresa y luego de su privatización, poniendo en tensión la distinción entre ciencia y política. La intervención del Estado, primero, y de empresas privadas, después, con el fin de desarrollar una producción “sustentable” basada en técnicas de manejo modernas, significó la reubicación o expulsión de pobladores tradicionales, en algunos casos, y la modificación de sus condiciones de vida en otros, a la vez que acabó profundizando la degradación ambiental. En efecto, esto lleva a la conclusión de que el territorio de Salta se transformó en un ‘bosque político’ y que los resultados negativos en términos socio-ambientales del proceso histórico ambiental desatado en el área de estudio a partir de la creación de Salta Forestal fueron causados no solo por factores exógenos o contingentes, como aparece en los discursos de los actores vinculados con el proyecto, sino que estaban inscriptos en la misma lógica de las ideas que justificaron su creación.

REFERENCIAS

- Barsky, O. y Gelman, J. (2001). Historia del agro argentino. Desde la conquista hasta fines del siglo XX. Grijalbo-Mondadori, Buenos Aires.
- Blaikie, P. y Brookfield, H. (1987). Land Degradation and Society. Methuen, London.
- Bryant, R. y Bailey, S. (1997). Third World Political Ecology. Routledge, London.
- Colina, P., Barbera, M., Pais, A. y Yudi, J. (2010). Análisis de los impactos de la expansión de la frontera agraria en la región del Chaco Salteño (Noroeste Argentino). VIII Congreso Latinoamericano de Sociología Rural.
- Expediente 5075 (2011). Poder Judicial de la Provincia de Salta.
- Expediente 242-1872 (2008). Informe de auditoría definitivo Salta Forestal SA. Auditoría General de la Provincia de Salta.
- Gil, Carlos (s/f). Informe sobre Salta Forestal SA. Documento consultado el 25/06/18 en el archivo de Salta Forestal SA.
- Gordillo, G., Leguizamón, J.M. (2002). El río y la frontera. Movilizaciones aborígenes, obras públicas y Mercosur en el Pilcomayo. Editorial Biblos, Buenos Aires.
- Huaranca, L.L., Mónico Serrano, F.H., Bárcena, H. y Seghezzeo, L. (2017). Estado actual de los indicadores de sustentabilidad de pequeñas y grandes producciones ganaderas del departamento Anta, provincia de Salta. En Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 5, 01.103-01.111.
- Jeckeln, G., Huaranca, L.L., Maclean, S., Volante, J.N., Mónico, F.H., Michaud, J.F., Bárcena, H., Suligoy, H., Seghezzeo, L. (2016). Diagnóstico y evaluación de la sustentabilidad de la ganadería de monte en el Chaco semiárido. El caso de Salta Forestal zona Sur, Departamento Anta, Provincia de Salta. Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 4, 01.89-01.99.
- Justiniano, M.F. y Oieni A.S. (2010). Salta Forestal S.A., un caso de sojización de tierras públicas en la era K. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Salta.

- Kallis, G. (2008). The Political Ecology of Deforestation. Notes on Three Contributions to the Subject. *Doc. Anal. Geog.* 52, 113-123.
- León, C., Prudkin, N. y Reboratti, C. (1985). El conflicto entre producción, sociedad y medio ambiente: la expansión agrícola en el sur de Salta. *Desarrollo Económico* 25, 99, 399-420.
- Ley 4981 (1974). Poder Legislativo de la Provincia de Salta.
- Ley 5857 (1982). Poder Legislativo de la Provincia de Salta.
- Ley 5949 (1982). Poder Legislativo de la Provincia de Salta.
- Ley 6727 (1993). Poder Legislativo de la Provincia de Salta.
- Liaudat, M. (2008). Industria y política pública. Los alcances de la intervención estatal en el desempeño del sector siderúrgico en Argentina. 1947-1976. *H-Industri@* 3, 1-29.
- Michaud, J.F y Mónico, F.H. (2008). Análisis socio-económico de la ganadería de monte en el Chaco semiárido (Salta Forestal, Dpto. Anta). INTA, Salta.
- Resolución 506 (1998). Ministerio de la Producción y el Empleo de la Provincia de Salta.
- Resolución 188 (1999). Ministerio de la Producción y el Empleo de la Provincia de Salta.
- Resolución 190 (1999). Ministerio de la Producción y el Empleo de la Provincia de Salta.
- Resolución 740 (2000). Ministerio de la Producción y el Empleo de la Provincia de Salta.
- Resolución 741 (2000). Ministerio de la Producción y el Empleo de la Provincia de Salta.
- Ortín, A. y Godoy J. (1999). Informe estudio de caso Salta Forestal S.A. Proyecto Bosque Nativo y Áreas Protegidas. Salta.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), 14-23.
- Paruelo, J.M., Verón, S., Volante, J., Seghezze, L., Vallejos, M., Aguiar, S., Amdan, L., Baldassini, P., Ciuffolif, L., Huykman, N., Davanzo, B., Landesmann, J. y Picardi, D. (2011). Elementos conceptuales y metodológicos para la Evaluación de Impactos Ambientales Acumulativos (EIAAC) en bosques subtropicales. El caso del Este de Salta, Argentina. *Ecología Austral* 21, 2, 163-178.
- Piccolo, A., Geogetti, M. y Chávez, D. (2008). Zonas agroeconómicas homogéneas: Salta-Jujuy. Estudios socio-económicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales. INTA, Salta.
- Rapoport, M. (2010). Las políticas económicas de la Argentina. Buenos Aires: Booket.
- Rougier, M. y Odisio, J. (2010). Estrategias de desarrollo y modalidades de financiamiento en el 'canto de cisne' de la industrialización argentina. *Escuela de Historia* 23, Facultad de Humanidades y Artes, Universidad Nacional de Rosario, 43-73.
- Robbins, P. (2012). *Political Ecology: A Critical Introduction*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Ruuskanen, E. y Väyrynen, K. (2017). Theory and Prospects of Environmental History. *Rethinking History. The Journal of Theory and Practice* 21, 4, 453-473.
- Saravia Toledo, C. (1997). *Ecodesarrollo integral: biológico, económico y social de Salta Forestal S.A.* Ecodesarrollo Salta S.A., Salta.
- Seghezze, L. (2009). The Five Dimensions of Sustainability. *Environmental Politics* 18, 4, 539-556.
- Seghezze, L., Volante, J., Paruelo, J., Somma, D., Buliubasich, C., Rodríguez, H., Gragnon, S., Hufty, M. (2011). Native Forests and Agriculture in Salta (Argentina): Conflicting Visions of Development. *Journal of Environment & Development* 20, 3, 251-277.
- Servetto, A. (2010). 73/76. El gobierno peronista en las provincias montoneras. Siglo XXI, Buenos Aires.
- Soler, A. y Abrahan, C. (2011). Tendencias en el movimiento de la estructura económico-social de la provincia de Salta. 1960-1980. En XII Jornadas de Investigación y Docencia de la Escuela de Historia, Universidad Nacional de Salta.
- Schmidt, M. (2017). *Crónicas de un (des)ordenamiento territorial. Disputas por el territorio, modelos de desarrollo y mercantilización de la naturaleza en el este salteño*. Teseo Press, Buenos Aires.
- Taylor, S. y Bogdan, R. (1992). *Introducción a los métodos cualitativos de investigación. La búsqueda de los significados*. Paidós, Madrid.
- Teubal, M. (2001). Globalización y nueva ruralidad en América Latina. En Giarraca, N. *¿Una nueva ruralidad en América Latina?*, pp. 45-65. CLACSO, Buenos Aires.
- Vandergeest, P. y Peluso, N.L. (2015). Political Forests. En Bryant, R.L. *Handbook of International Political Ecology*. Edward Elgard, London.

Volante, J. y Seghezzo, L. (2018). Can't See the Forest for the Trees: Can Declining Deforestation Trends in the Argentinian Chaco Region be Ascribed to Efficient Law Enforcement? *Ecological Economics* 146. 408-413.

Watts, M. (2003). Political Ecology. En Shepperd, E. y Trevor, J.V. *A Companion of Economic Geography*, pp. 257-274

Zarrilli, A. (2014). Argentina, tierra de promisión. Una interpretación historiográfica de las relaciones entre la historia rural y la historia ambiental. *Revista de Historia Iberoamericana* 7, 1, 107-132.

ABSTRACT: The public firm Salta Forestal S.A. was created in 1974 in the department Anta of the province of Salta. Through an “integral” and “rational” exploitation of the forest, the aim of the enterprise was to supply charcoal and wooden poles demanded by state enterprises. This work examines from the standpoint of political ecology the environmental history of the firm in the 1974-2017 period. Textual, oral and visual sources were analysed with a focus on the power relations that operated in the nature-society interface. The main result of this analysis is that Salta Forestal, based upon an eco-modernizing ideology and a sustainable development discourse, transformed his territory in a political forest characterized by socio-environmental conflicts and a deepening of environmental degradation. The conclusion is that the negative results of the firm in socio-environmental terms were already inscribed in the logic of the ideas that justified his creation.

Keywords: Salta Forestal, political ecology, environmental history and sustainability.

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL OCEANO EN EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LOS EDIFICIOS: ANÁLISIS RETROSPECTIVO, PRESENTE Y PROSPECTIVO

David Morillón¹, Rodolfo Silva¹, Ramsés Lopez² y Jorge A. E. Santos²

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

² Universidad Autónoma de Sinaloa

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, CP 04510 Tel: 52 55 56233600,

Email: damg@pumas.ii.unam.mx, RSilvaC@ii.unam.mx, ramcs_lp@hotmail.com y jorge.jaes16@gmail.com

Recibido 05/08/18, aceptado 14/09/18

RESUMEN: De las preocupaciones de la humanidad se tiene el cambio climático, por impactos que puede tener en los sectores y lugares, por ello este estudio, tiene como objetivo analizar el clima de Culiacán, Sin., ciudad ubicada en cálido seco de México, del periodo de 1950 a 2010, para identificar si se ha presentado el cambio climático, estudiar los efectos en el bioclima y edificios de la región. La metodología parte de un estudio del bioclima, para las condiciones del clima pasado y actual, además de elaborar un escenario al 2050, con los diagramas anuales de las necesidades bioclimáticas obtenidos, se calcularon los días grado para enfriamiento y calentamiento, el consumo de energía para la climatización, así como emisiones de CO₂ relacionadas. Como conclusión se tiene la evidencia del cambio climático, en aumentado de temperaturas, disminución de condiciones de confort, aumento en requerimientos de energía para climatización y emisiones CO₂ relacionadas.

Palabras clave: Confort, emisión de CO₂, cambio climático, consumo de energía en edificios.

INTRODUCCIÓN

Un problema que actualmente presentan los edificios en México es el uso excesivo de la energía convencional para la climatización, entre 50 al 60 % (I García, D. Morillón, 2014), debido al origen de dicha energía se presentan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), si además se considera el impacto que podrían tener los edificios por el efecto cambio climático, como en la disminución de las condiciones de confort, el aumento en el consumo de energía y emisiones de CO₂ relacionadas. Dichos estudios son importantes para contar con bases y definir estrategias de mitigación de GEI y ahorro de energía.

A continuación, se presentará el impacto del cambio climático y el océano, mediante escenarios retrospectivos, actuales y prospectivos, en el bioclima, el uso final de la energía en los edificios, por la utilización de los sistemas de climatización y el CO₂ relacionado, ante el aumento evidente de la temperatura, por el calentamiento global. Ello permitirá contar con bases para definir estrategias, y cuantificar beneficios por la mitigación de los GEI, el ahorro de energía y la adaptación de los edificios, el caso de estudio es la ciudad de Culiacán, Sinaloa, ubicada en clima cálido seco, en la costa del Pacífico mexicano.

Los trabajos directamente relacionados con el estudio del impacto de cambio climático en los edificios son los de Sheinbaum (1996), realizó un estudio energético de la vivienda en México y el CO₂ relacionado con el uso de energía por el equipamiento de la misma, Morillón (2004) presenta un estudio de impacto del océano en el bioclima de México, mientras que Tejeda (2007) presentó un estudio sobre cambio climático y la vivienda en varias ciudades de México, para los escenarios para el

2020 y 2050, Morillón (2008) Cuantificaron el CO₂ relacionado con medidas de mitigación en la vivienda, con el proyecto hipoteca verde, Rosas-Morillón (2010) estudiaron el CO₂ relacionado con la vivienda en México, Morillón-García (2014) presentaron el consumo, uso final de la energía y CO₂ relacionado en los edificios de los diversos climas de México, García-Morillón (2016) presenta el impacto del cambio climático en el bioclima de México, para las condiciones pasadas, presentes y futuras, por lo anterior es necesario estudiar el clima cálido seco, que ocupa la zona norte del país, evaluar el impacto en el bioclima y los edificios, en cuanto condiciones de confort, consumo de energía y CO₂ relacionado.

METODOLOGIA

1. Se analiza, en forma comparativa, el clima de Culiacán, Sinaloa, de los periodos del 1951-1980 y 1981-2010
2. Se elabora escenario del clima al 2050, con base en los datos climáticos actuales y la base de datos del software Meteonorm
3. Se realiza estudios del bioclima para obtener los diagramas anuales de las sensaciones térmicas, para los tres casos o periodos de tiempo, para la ciudad de Culiacán
4. Se identifica, en los diagramas anuales de las sensaciones térmicas, los impactos en las condiciones de confort, cuantitativamente
5. Se calculan los días grado para enfriamiento de cada periodo de estudio
6. Se estima el requerimiento de energía para un edificio con fachadas de vidrio claro, para los tres periodos de estudio
7. Se calcula el CO₂ relacionado con el uso de energía necesario para la climatización, para los tres periodos del estudio

RESULTADOS

El cambio climático en Culiacán es una realidad, como se observa en la figura 1, donde se compara las temperaturas de los periodos de 1951-1980 y el 1981-2010, información obtenida de las normales climatológicas (SMN, 2018).

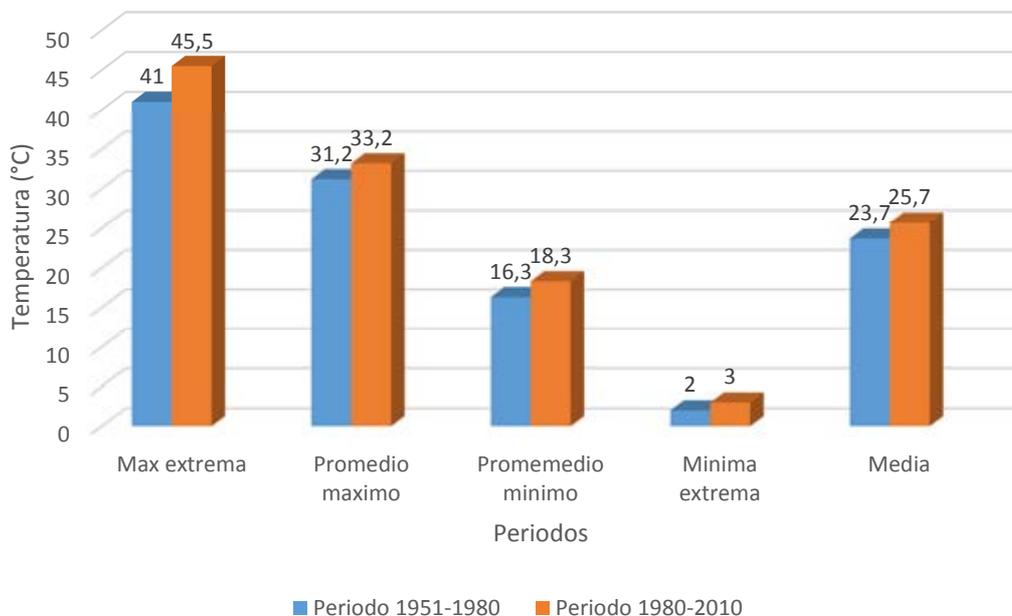


Figura 1. Comparación de las temperaturas de los periodos 1951-1980 y 1981-2010

En la figura 1 se observa el cambio en las temperaturas, entre los periodos seleccionados: 1951-1980 y 1981-2010, para el caso de Culiacán, Sin., ciudad ubicada en clima cálido seco, el aumento de las

temperaturas se presente entre 2 y 4 °C, para la máxima y mínima extrema, la promedio máxima y mínima, así como en las medias, esto evidencia el impacto del cambio climático.

Escenario al 2050

A partir de las condiciones climáticas del periodo de 1981-2010 se estimó para el 2050, con el software Meteonorm, los datos de temperaturas promedio máxima y mínima, así como la medida (Tabla 1).

CULIACAN, CULIACAN, SIN
ALTITUD 40 MS.N.M.

PARAMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURAS													
PROMEDIO DE MAXIMA	29.9	30.6	32.2	34.7	36.8	37.1	35.9	35.4	35	35.1	32.4	30.6	33.8
MEDIA	22	22.9	24.4	26.9	29.5	31.7	30.9	30.4	30	28.9	25	22.9	27.1
PROMEDIO DE MINIMA	14.6	15.1	16.5	19.06	22.2	26.2	25.8	25.4	25.04	22.7	17.5	15.1	20.4

Tabla 1. Escenario de temperaturas al 20150.

En la figura 2 se comparan las temperaturas para los tres periodos de estudio (1951-1980, el 1981-2010 y al 2050).

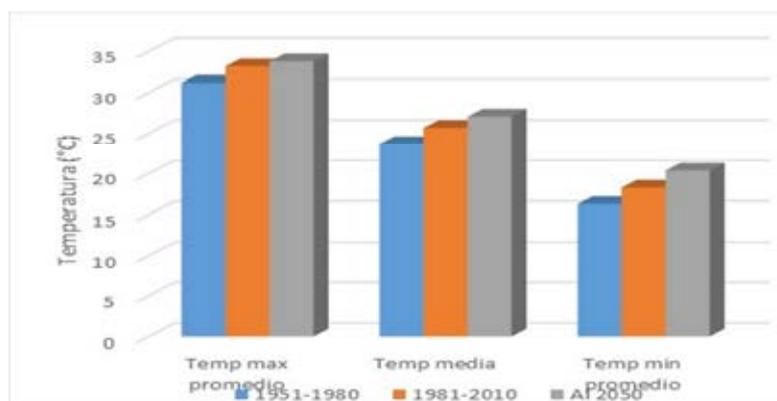


Figura 2. Comparación de las temperaturas de los tres periodos estudiados

Se aprecia en a figura 2 que es evidente el impacto del cambio climático, en el aumento de las temperaturas máxima promedio, media y mínima promedio.

Estudio del bioclima

Con los datos de las temperaturas, de cada uno de los tres periodos, tomando como retrospectiva (1951-1980), situación actual (1981-2010), como futuro al 2050, en el caso de la humedad relativa, se generaron los datos horarios promedios mensuales, con base en las temperaturas, en el programa Biosol (2013), se realizaron los estudios del bioclima en la carta bioclimática de Olgay, obteniendo los diagramas anuales de sensaciones térmicas, donde se identifican las condiciones de calor, confort y frío, por horas y meses promedio del año (Fig. 3, 4 y 5).

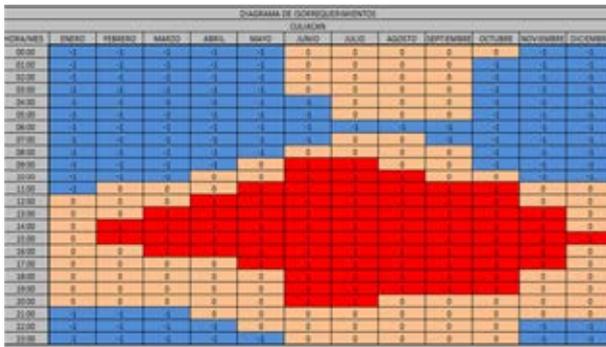


Figura 3. Diagrama anual de sensación térmica en la ciudad de Culiacán, Sin. (1951-1980)

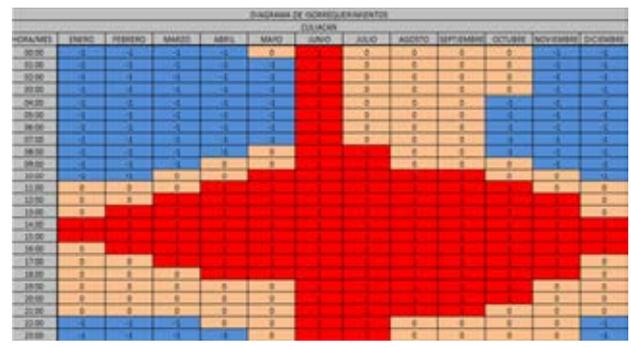


Figura 4. Diagrama anual de sensación térmica en la ciudad de Culiacán, Sin. (1981-2010)

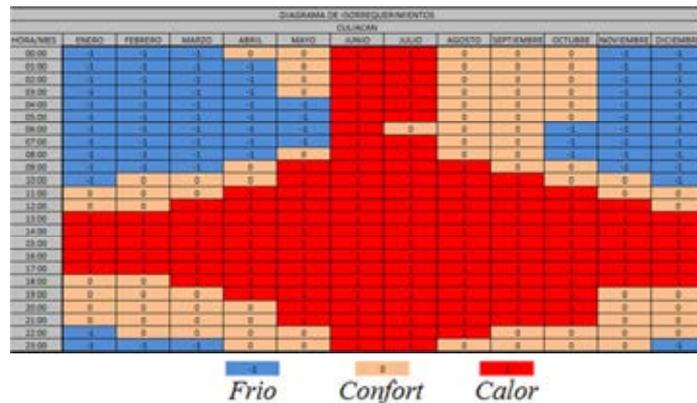


Figura 5. Diagrama anual de sensación térmica en la ciudad de Culiacán, Sin. (AI 2050)

Del estudio de bioclima, de los tres periodos, se observan los cambios significativos en las condiciones de calor, durante el periodo 1951-1980 (Fig. 3) la ciudad presenta condiciones de calor predominante en los meses de verano, sin embargo presenta condiciones de confort y frío en las estaciones de primavera, otoño e invierno, en el caso 1981-2010 (Fig. 4) las condiciones de calor aumentan y disminuye el confort y frío, en el escenario al 2050 (Fig. 5), debido al aumento de temperatura para todos los meses, aumenta de manera significativa las condiciones de calor.

Impactos en los edificios por el cambio climático

Con base a los estudios del bioclima, de los tres periodos, se realizó el cálculo de los requerimientos de enfriamiento (Tabla 2), consumo energético y emisiones de CO₂ relacionadas con el uso de la energía convencional.

Grado Día

Periodo	Ciudad	Grados día de enfriamiento anual (°C)
1951-1980	Culiacán, Sinaloa.	917.1
1981-2010	Culiacán, Sinaloa.	1,008.3
2050	Culiacán, Sinaloa.	1,149.8

Tabla 2. Grados día de enfriamiento anual en bioclima cálido seco (Culiacán, Sin.): Retrospectiva, actual y prospectiva

Consumo de energía

Si se considera un edificio con fachadas de vidrio claro, caso extremo en envolvente arquitectónica, pero cada vez más de uso común en el mundo, para estimar el requerimiento energético (Tabla 3) en climatización con aire acondicionado.

Periodo	Ciudad	Índice de consumo de energía (kWh/m²)
1951-1980	Culiacán, Sin.	117
1981-2010	Culiacán, Sin.	128.65
2050	Culiacán, Sin.	146.7

Tabla 3. Energía por unidad de superficie anual, bioclima cálido seco, Culiacán, Sin.: Retrospectiva, presente y Prospectiva

Emisión de CO₂ (relacionadas al consumo de energía)

Bioclima	Ciudad	Emisión de CO₂ por consumo de energía (kg/m²)
1951-1980	Culiacán, Sin.	40.95
1981-2010	Culiacán, Sin.	45.03
2050	Culiacán, Sin.	51.45

Tabla 4. Emisiones de CO₂ relacionadas al consumo de energía, bioclima cálido seco, Culiacán, Sin.: Retrospectiva, presente y Prospectiva.

Se presenta el impacto a los edificios, considerando solo el bioclima actual, equipamiento y diseño, para cuatro grandes zonas de México, se resalta el caso de los océanos en el estudio, por ser dos en casi forma paralela que impactan al país, el consumo y el uso final de energía en los edificios del país se presenta en la figura 6, sin lugar a dudas retos actuales para el ahorro de energía y trabajo por hacer ante los impactos del cambio climático en el tiempo.

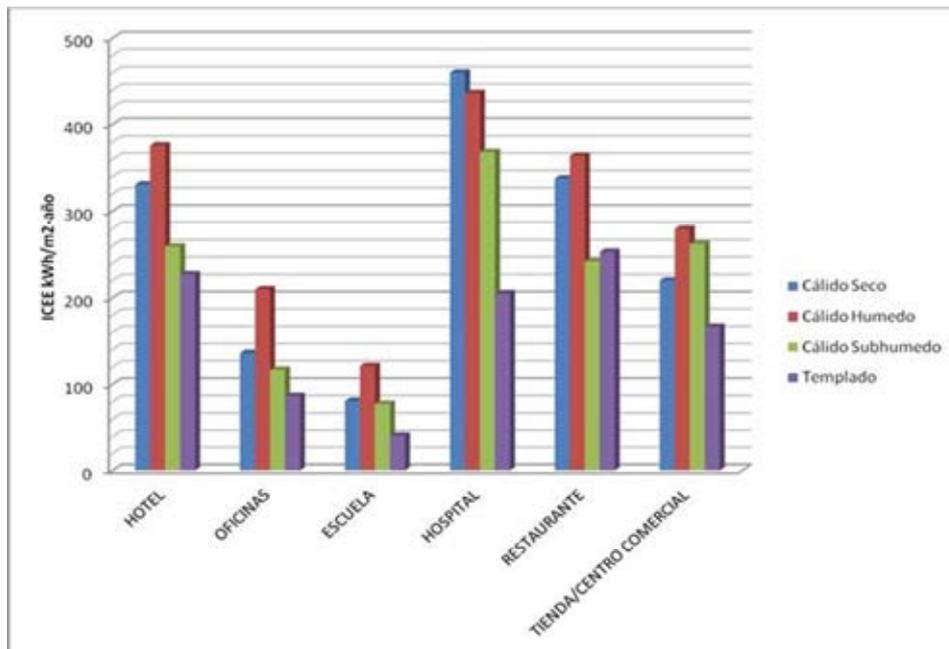


Figura 6. Consumo de energía por tipo de edificio en los climas de México. (Morillón et al, 2014)

CONCLUSIÓN

Se identificó que es evidente el cambio climático en el caso de Culiacán, Sinaloa, clima cálido seco, y como este impacta a los edificios; energética y ambientalmente, para los escenarios del pasado, presente y en futuro.

Las emisiones de CO₂ estimadas se refieren al consumo de energía convencional para la climatización, por uso de los sistemas de aires acondicionados. Debido al origen de la energía que se usa en México, donde el 90 % de la misma tiene su origen en las energías no renovables (SENER, 2017).

En el bioclima cálido seco, la ciudad de Culiacán, el cambio climático se manifestó con aumento en las temperaturas, por lo tanto, en menos horas de confort en el ambiente. Por lo anterior es importante el uso de materiales de construcción y diseños adecuados a las características climáticas futuras de la región, con el fin de que sea aptas ante el cambio climático.

Todos los tipos de edificios; comerciales o de servicios, vivienda y públicos, deben considerar estrategias, cuya base serán los estudios del bioclima con los impactos del cambio climático para la adaptación de los edificios nuevos, con estrategias resilientes.

Por último, se debe tomar en cuenta el mejoramiento y el impulso de programas de ahorro y uso eficiente de energía eléctrica como materiales adecuados al clima, diseño de edificios cuyo fin sea la climatización con sistemas pasivos, esto mediante normas, certificaciones y programas de financiamiento.

REFERENCIAS

- Andrade L (2015) Diagnóstico y Adecuación Térmica de Tienda de Autoservicio para Bioclimas de la República Mexicana: Impactos y Beneficios Energéticos y Ambientales, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Flores J A, Flores D y Morillón D (2010), Saturation, energy consumption, CO₂ emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico. Energy and Buildings, Vol. 43, pp 10-18, oct 2010, ISSN: 0378-7788

- Iván García Kerdan, David Morillón Gálvez, Rokia Raslan y Paul Ruyssevelt (2014), Modelling the energy and exergy utilization of the Mexican non-domestic sector: A study by climatic regions, *Energy Policy*, Ed. Elsevier, 10.1016, pp. 16, 25 Oct. 2014, Estados Unidos, ISSN: 0301-4215
- García Kerdan, I., Raslan, R., Ruyssevelt, P., Morillón Gálvez, D. (2017). A comparison of an energy/economic-based against an exergoeconomic-based multi-objective optimisation for low carbon building energy design, *Energy*, 128, 244-263, 28 de mar, ISSN: 0360-5442
- Carlos A. García V., Carlos E. Tapia L y David Morillón G. (2016), Cambio climático y los efectos en el bioclima cálido seco: Análisis retrospectivo y prospectivo, Memorias de la XL Semana Nacional de Energía Solar, CD, ABC-210, pp182-186, ISSN: 2448-5543, Ed. Asociación Nacional de Energía Solar, Puebla, Pue., oct., México
- James Hansen (1988), Cambio Climático Global como pronóstico del Modelo Tridimensional del Instituto Goddard de Estudios Espaciales publicado en [Journal of Geophysical Research](#).
- Jauregui, Ernesto & Tejeda Adalberto. 2001. A scenario of human thermal comfort in Mexico City for 2CO₂ conditions. *Revista Atmósfera*, Vol. 14, 2001 Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- IPCC (1988) sustentó científicamente el calentamiento, por el programa de las naciones unidas para el medio ambiente.
- Morillón, D (2004, Human bioclimatic Atlas for Mexico, Solar energy, Ed. Elsevier, Alemania.
- David Morillón, Iván García y Azucena Escobedo, (2015), Retos y oportunidades para la sustentabilidad energética en edificios de México: Consumo y uso final de energía en edificios residenciales, comerciales y de servicio, Editorial II-UNAM, ISBN 978-607-02-6285-2, feb., México
- Servicio Meteorológico Nacional (2018) Normales climatológicas, CONAGUA, Disponibles en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=sin>, México
- Oscar Preciado y David Morillón, (2013), Herramientas para el diseño de edificios bioclimáticos: Estudio del bioclima, diseño del control solar, radiación solar y potencial de iluminación natural, Ingeniería de la energía solar para la sustentabilidad, Editorial II-UNAM, ISBN 970-32-0196-2, p 135-174, México
- SENER, (2017), Balance Nacional de Energía 2016, Ed. Gobierno Federal, México
- United Nations Environment Programme (2009), Sustainable buildings and climate initiative “building and climate change”, Naciones unidas

ABSTRACT: Humanity's concerns include climate change, due to the impacts it can have on sectors and places, and for this reason, this study aims to analyze the climate of Culiacán, Sin., A city located in Mexico's hot dry season. from 1950 to 2010, to identify if climate change has been presented, to study the effects on the bioclimate and buildings of the region. The methodology is based on a study of the bioclimate, for the past and present climate conditions, in addition to developing a scenario to 2050, with the annual diagrams of the bioclimatic needs obtained, the days were calculated for cooling and heating, energy consumption for air conditioning, as well as related CO₂ emissions. In conclusion, there is evidence of climate change, increased temperatures, decreased comfort conditions, increased energy requirements for air conditioning and related CO₂ emissions.

Keywords: Comfort, CO₂ emission, climate change, energy consumption in buildings.