

SISTEMA ACUMULADOR/AMORTIGUADOR TÉRMICO SOLAR PASIVO PARA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE ESPACIOS AGRO-PRODUCTIVOS

Juan Jodra¹, Graciela Viegas², Gustavo San Juan³, Carlos Discoli⁴

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido iipac@fau.unlp.edu.ar

Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata.

Calle 47 N° 162, CC 478. Tel/fax +54-0221-4236587/90 int 254. La Plata (1900)

E-mail: juanjodra@gmail.com; gachiviegas@yahoo.com.ar; gustavosanjuan60@hotmail.com; discoli@rocketmail.com

Recibido 25/07/17, aceptado 24/09/17

RESUMEN: El trabajo expone el desarrollo de un sistema acumulador / amortiguador de calor solar industrializado y modular. Se trata de un sistema pasivo versátil, orientado a satisfacer requerimientos de climatización y/o estabilización térmica de espacios de uso productivo. Se muestra el estudio de antecedentes, el proceso de diseño y los prototipos desarrollados, teniendo en cuenta componentes constructivos, geometrías y materialidades. Se presentan los resultados de operación del sistema en un espacio productivo tipo invernadero emplazado en un laboratorio a cielo abierto. Los mismos muestran un comportamiento térmico favorable, registrándose una reducción de la amplitud térmica en el interior del espacio en comparación a la situación del invernadero sin el sistema. Se disminuyeron los picos de calentamiento diurno, se estabilizaron las temperaturas de base durante el período nocturno y se evitó el fenómeno de inversión térmica.

Palabras Claves: energías renovables, sistemas solares pasivos, acumulador-amortiguador térmico, almacenamiento de energía, invernaderos

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas solares pasivos para climatización que incorporen masa de acumulación, resultan efectivos para el planteo de estrategias que ayudan a estabilizar ambientes y minimizar costos en cuanto a energía de climatización.

El origen de los sistemas pasivos mágicos tradicionales, si bien fueron concebidos para climatizar viviendas, se remonta a finales del S XIX, cuando Edward Morse patenta su trabajo: “*Warming and ventilating apartments by the sun’s rays*” US Patent 24662, en el año 1881. Sin embargo su difusión, implementación y desarrollo, comenzó unos 80 años más tarde, en la década del sesenta, con las construcciones realizadas por el Ing. Felix Trombe y el Arq. Jacques Michel en las casas pasivas de la localidad francesa de Font-Romeu-Odeilo-Via, en los Pirineos orientales. Ésta intervención dinamizó la temática solar térmica extendiendo el conocimiento de estas tecnologías bajo el nombre de “*muros Trombe-Michel*”, y dejó en segundo plano los orígenes inicialmente mencionados.

Posteriormente se iniciaron múltiples desarrollos con variantes principalmente sobre la materialidad de la masa de acumulación de calor y la aplicación en diferentes localizaciones (distintos climas y recurso solar). En diversas regiones de Europa y EEUU se han observado ejemplos aplicados fundamentalmente en el sector residencial. A partir de estos desarrollos orientados a cubrir demandas

¹ Becario CONICET

² Investigadora CONICET

³ Investigador CONICET, Co-Director de Beca

⁴ Investigador CONICET, Director de Beca

de climatización de “base”, sin utilizar energías convencionales para su funcionamiento, se comenzó a acuñar el concepto de “sistemas pasivos”. Luego, se comenzaron a establecer criterios básicos para su implementación en edificios e incorporar algunas pautas aplicables a la construcción y su utilización sistemática (Balcomb, et al 1980), (Balcomb, et al 1981), (Balcomb, et al 1998).

En cuanto al desarrollo tecnológico, se profundizaron los estudios con relación a la variación de la masa de acumulación, su materialidad y capacidades de carga en sus diferentes aspectos termo-físicos (A. Di Vecchia, et al, 1979). También se exploraron combinaciones en la masa de acumulación haciendo uso de diferentes materiales con cambio de fase (Zalewski, Joulin, Lassue, Dutil, & Rousse, 2012), con el objeto de aprovechar el calor sensible y el calor latente en las masas de acumulación, aplicando el concepto de diodo térmico (Bourdeau, Jaffrin, & Moissam, 1980).

Contemporáneamente en Argentina también se realizaron significativos desarrollos solares pasivos, mayoritariamente aplicados al sector residencial, y en menor medida al productivo. En vivienda colectiva, por ejemplo se llevó adelante el programa CESAD “Conjunto de viviendas con energía solar de alta densidad”, desarrollado en 1978 por el Instituto de Arquitectura Solar de La Plata⁵. Simultáneamente a esta experiencia y hasta la actualidad, se registran importantes antecedentes en varios centros de investigación emplazados en diferentes regiones y climas del país (E. Alanis, 1978; J. L. Guerrero et al., 1979; J. J. Elicabe Urriol, R. Gaspar 1980; J. L. Guerrero et al 1984; E. Alanis 1978; G. Lesino et al., 1978; G. Lesino et al., 1981; J. L. Guerrero 1984; C. Discoli et al., 1985; C. Discoli et al., 1986; C. Discoli, et al., 2011) modelo de aplicación Discoli, Viegas, 2014; Patente: Discoli, C., San Juan, G., 2010; Discoli, C., Viegas, G., & San Juan, G., 2012).

Con respecto a los espacios destinados a la agro-producción, el uso de sistemas solares térmicos pasivos se circunscribe en general a la implementación de invernáculos livianos tradicionales. En algunos casos, se cuenta con sistemas auxiliares de climatización para estabilizar el ambiente durante los períodos adversos en el ciclo diurno/nocturno, utilizándose principalmente equipos convencionales (combustibles sólidos, líquidos y gaseosos) y biomasa, en la mayoría de los casos con ignición directa. Los mismos permiten mantener una temperatura establecida en los espacios, y reducir la amplitud térmica. Se busca así, evitar diversos daños en los cultivos producidos por picos de calentamiento indeseado durante el periodo diurno, o por heladas durante la fase nocturna, aunque con significativos gastos operativos en combustible e importantes niveles de contaminación directa e indirecta. Si bien estos sistemas son los más difundidos, existen diferentes antecedentes que plantean la utilización de energías renovables acumulando energía térmica en reservorios auxiliares, combinadas con *sistemas activos* de bombeo o ventiladores, para la circulación de un caudal de agua (Suárez, 2012), o aire (Bistoni, Iriarte, & Saravia, 2004) (Juanicó, Piacentini, & La Mattina, 2011), como fluidos de intercambio (ver figura 1). En su mayoría utilizan reservorios térmicos auxiliares con ganancia solar directa externos al espacio de producción.

En cuanto a los *sistemas pasivos*, su principio básico consiste en la utilización de la irradiación solar directa (ganancia solar directa), combinada con elementos de acumulación térmica (masa) con elevada capacidad calorífica, distribuidos dentro del propio espacio de producción (criaderos, parideras, invernaderos, etc.). De esta manera se logra amortiguar (bajo el concepto de inercia térmica) los picos de temperatura que se producirían con el sobrecalentamiento diurno, a la vez que se incrementa la temperatura de la masa de acumulación distribuida. Dicha energía es entregada durante el periodo nocturno aportando a mantener el espacio en un mayor nivel térmico. Un buen ejemplo de ello son los invernaderos solares pasivos tradicionales chinos (Li-Hong, Mei, Hua-Zhong, Xiao-Lei, Qing-Yun, & Zhen-Xian, 2010), desarrollados durante la década de 1980 (ver figura 1). Los mismos consisten en una pared lateral aislada de elevada masa térmica, combinada con una cubierta transparente orientada hacia el ecuador que incorpora un sistema de aislación nocturna enrollable. Otros antecedentes más recientes, plantean soluciones no industrializables utilizando materiales reciclados como botellas PET para la conformación de muros inercialores con acumulación en agua (Esteves & Gelardi, 1999).

⁵ Proyecto realizado para la Secretaría de Estado de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Provincia de Buenos Aires (convenio B2 SDT 05.78)

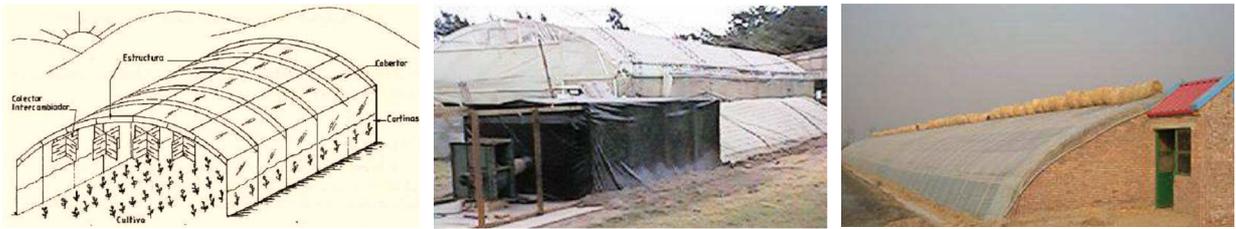


Figura 1: Sistema de climatización con captación solar y circulación forzada de agua (Fuente: Suarez, 2012); Sistemas de climatización con captación solar y circulación forzada de aire (Fuente: Bistoni et al, 2004); Invernadero solar pasivo chino (Fuente: Li-Hong et al, 2010)

En función de los antecedentes estudiados, este trabajo aborda dicha problemática, planteando una solución tecnológica solar pasiva. Se diseña un sistema modular industrializable que utiliza los principios de acumulación de calor y amortiguamiento térmico permitiendo el acondicionamiento y la estabilización de espacios agro-productivos.

A continuación se presenta el diseño, desarrollo y ensayos de un sistema de alta capacidad de carga térmica y de uso versátil, denominado “*Sistema Acumulador/Amortiguador Térmico Solar Pasivo*”. El mismo está compuesto por piezas modulares industrializadas con materialidades mixtas, conformadas por bloques pre-moldeados de hormigón pigmentado y vainas cilíndricas plásticas estancas llenas con agua. Su diseño permite implementar en su armado diferentes configuraciones equivalentes a los muros acumuladores de calor (MAC) o “Trombes” dispuestos lateralmente, y/o distribuidos en diferentes sectores conformando soportes de masadas de trabajo, acopio, etc.

En cuanto a los usos, el sistema propuesto objeto de este trabajo, puede implementarse en instalaciones agropecuarias como invernaderos, parideras, criaderos, etc. Sus diferentes configuraciones dependerán de los requerimientos de operación del espacio de producción, y del recurso helio-energético disponible entre otros factores. En función del conjunto de dichos factores, se plantea la disposición más apropiada para cada caso particular. El trabajo plantea diseñar y ensayar en un invernadero dichos sistemas mediante la incorporación de “acumuladores/amortiguadores térmicos” mixtos (bloques de hormigón y vainas con agua). Se instala una de las configuraciones analizadas, reproduciendo las estructuras portantes de mesas de cultivo.

En síntesis, se desarrollarán en los puntos siguientes las etapas de diseño y fabricación de los prototipos; se analizan diferentes configuraciones de armado en un espacio productivo tipo invernadero, y variantes en cuanto a las relaciones de capacidad calorífica y materialidades y se muestran los primeros ensayos para un caso a los efectos de evaluar el comportamiento térmico en laboratorio a cielo abierto.

METODOLOGÍA

En función de los objetivos planteados, desarrollamos la metodología de abordaje en las siguientes etapas:

i. Elaboración de una matriz de evaluación de antecedentes y aspectos ponderados.

Se seleccionaron los sistemas tecnológicos más significativos y se compararon mediante una matriz de evaluación en la que se plantearon de manera ponderada, los aspectos de interés para los objetivos de este trabajo. Estos fueron: capacidad calorífica, capacidad de descarga, capacidad de retardo, versatilidad de aplicación, facilidad de construcción o armado, asequibilidad económica, y factibilidad de industrialización del diseño. A partir de ella se evaluaron alternativas de prototipos posibles.

ii. Diseño conceptual y técnico de los prototipos.

Se trabajó sobre el diseño teórico-conceptual y técnico de distintos prototipos, utilizando herramientas de apoyo como CAD y Sketch up (dibujo 3D). Se definieron los diferentes aspectos tecnológicos relacionados con los parámetros termo-físicos, geométricos y de materialidad necesarios para su fabricación.

Se concretó un prototipo implementando una masa de acumulación térmica mixta (sólido + agua) dando respuesta a los requerimientos mencionados (versatilidad, maximizar la capacidad de carga, agilidad, etc.). Se ha diseñado un sistema modular industrializado compuesto por dos tipos de piezas: Las sólidas corresponden a piezas premoldeadas de hormigón pigmentado (negro de humo) y para contener el agua se diseñaron vainas plásticas estancas conformadas a partir de tubos comerciales de PVC de 160 mm de diámetro y sus correspondientes tapas ciegas. El sistema permite diferentes configuraciones de armado, pudiendo modificar la relación de masas (sólido + líquido) y su consecuente capacidad de carga térmica.

iii. Ensayo del sistema

Con el objetivo de climatizar y estabilizar térmicamente los espacios de producción, los ensayos evalúan el desempeño y las potencialidades del sistema. Para tal fin se plantea el ensayo con un invernadero de cultivo. El plan de ensayos tiene dos etapas sucesivas y plantea un análisis comparativo entre un invernadero sin sistema y con sistema:

- La primera etapa consistió en la medición sobre el espacio vacío, sin la incorporación del sistema acumulador/amortiguador. De esta manera se evalúa la situación de base del invernadero registrando las fluctuaciones térmicas sin ningún dispositivo de climatización.
- La segunda incorpora una materialidad mixta combinando los bloques de hormigón con vainas de PVC con agua pintadas en color negro mate, con una masa total de 864 kg. Esta etapa permite realizar un análisis comparado con el caso anterior verificando potencialidades y aptitudes térmicas de dicho sistema.

La instrumentación del ensayo se resolvió mediante el uso de adquisidores de datos marca HOBO, registrándose en total 9 parámetros: temperatura exterior, temperatura de aire interior (dos puntos a distinta altura), temperatura de bloques (cuatro puntos), y temperatura del agua (dos puntos). Los datos climáticos y de radiación se obtuvieron a través de una central meteorológica *Davis Vantage PRO 2*.

RESULTADOS

i. Elaboración de una matriz de evaluación de antecedentes sobre aspectos ponderados

A partir del análisis de los diferentes desarrollos expuestos en los antecedentes, se confeccionó una matriz de evaluación basada en los aspectos técnicos de interés. Se seleccionaron los casos significativos, teniendo en cuenta su diversidad tecnológica y conceptual. La matriz presenta cronológicamente los principales sistemas orientados a climatizar espacios, permitiendo analizar su evolución y comparar sus atributos. A partir del estudio de los diferentes desarrollos se incorporó una valoración basada en siete aspectos tecnológicos de interés. Estos fueron: capacidad calorífica, capacidad de descarga térmica, capacidad de retardo en el ciclo de carga/descarga, versatilidad ante su aplicación en diferentes espacios y distribuciones geométricas, facilidad de construcción o armado, asequibilidad económica y factibilidad de industrialización del diseño (fabricación en serie de componentes). Cada uno de estos aspectos fue ponderado y comparado en función de los criterios planteados en los objetivos. Se partió de una evaluación sobre una escala de ponderación cualitativa (alta, media, baja, etc.) y luego, dichas valoración se relacionó con una escala numérica de 1 a 10 a los efectos de poder cuantificar los resultados definitivos.

Por ejemplo, aspectos tales como “versatilidad” o “factibilidad de industrialización del diseño” o “accesibilidad económica”, son características esenciales de acuerdo a los objetivos propuestos para el sistema, en consecuencia se les ponderaron con una alta valoración en la escala. De esta manera se procedió con el resto de los aspectos. El puntaje o valoración de cada sistema tecnológico, corresponde al promedio ponderado de los puntajes obtenidos en cada uno de los aspectos. La Tabla 1 muestra la matriz de evaluación de los sistemas analizados y el sistema expuesto en este trabajo. La valoración obtenida para cada sistema tecnológico, a partir de los criterios establecidos y requerimientos, permitió fundamentar la viabilidad de cada uno de ellos. Con los atributos y datos incluidos en la matriz (tabla

	Aspecto	Capacidad Calorífica		Capacidad de Descarga		Capacidad de retardo		Versatilidad		Facilidad de construcción		Asequibilidad económica		Factibilidad de industrialización		Puntaje total
	Ponderacion del aspecto	8		6		8		10		9		9		10		
	ANTECEDENTE	Evaluación	ptos.	Evaluación	ptos.	Evaluación	ptos.	Evaluación	ptos.	Evaluación	ptos.	Evaluación	ptos.	Evaluación	ptos.	
1	Muro "Trombe-Michel" (Trombe, F. & Michel, J., 1971)	Media. Acumulación en muro solido, de roca o concreto	6	Alta. Descarga convectiva controlada	7	Baja. Funciona en forma continua entregando el calor durante el día	4	Baja	4	Media. Construcción en obra, según materialidad	6	Alta. Materiales de construcción	8	Muy baja. De construcción local	1	4,97
2	"Muro colector acumulador en agua" (Discoli, Rosenfeld, 1986)	Muy alta. Acumulacion en fluido	10	Alta. Descarga controlada. Requiere alto nivel de aislacion y control de filtraciones.	7	Muy alta. Mayor a un día	9	Media. Diseño de prototipo experimental	5	Media. Requiere precision en aislacion y control de filtraciones.	7	Media	6	Baja. De construcción local	4	6,68
3	Muro de botellas de pet para incrementar la inercia en invernaderos para cultivos (A. Esteves, D. Gelardi, 1999)	Muy alta. Acumulacion en fluido	10	Alta.	8	Muy baja.	1	Muy baja. Esta constituido por botellas colocadas en el interior del espacio.	1	Baja. Metodo artesanal.	4	Baja. material reciclado.	8	Baja. Material reciclado.	4	4,90
4	Invernadero con acondicionamiento termico solar (H. Suarez, 2012)	Alta. Acumulacion en fluido	8	Alta. Controlada por bombeo. Convectiva.	7	Muy alta. Controlada por bombeo. Sistema activo.	9	Baja. Solo para invernaderos y espacios similares	4	Baja. Requiere estructura reforzada e instalación hidráulica.	4	Baja. Requiere instalación hidráulica para bombeo.	4	Alta. Con utilización de piezas de mercado.	7	6,00
5	Colectores acumuladores cilindricos con sustancias con cambio de fase (Martín Morales y Angélica Boucíguez, 2007)	Muy alta. En material con cambio de fase	10	Alta. Conveccion natural	7	Media.	5	Baja. Prototipo, no resuelve forma de instalacion y uso.	4	Alta. Recipientes cilindricos moviles	7	Media. Sustancias organicas con cambio de fase	6	Alta.	7	6,48
6	Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material (L. Zalewska, A. Joulin, 2011)	Muy alta. En material con cambio de fase	10	Alta. Descarga convectiva controlada	8	Alta. Descarga convectiva controlada	8	Media. Diseño de prototipo experimental	5	Media. Diseño de prototipo experimental	5	Baja. Incorpora materiales con cambio de fase	4	Alta. Diseño de prototipo experimental en escala pequeña	7	6,55
7	MAC Mixtos (Discoli, San Juan, 2010) - Prototipo patentado bajo IMPI 20110100010, Oficina de patentes de CONICET.	Alta. Acumulacion en fluido + hormigón	8	Alta. Semi-Controlada	7	Media. de 4 a 6 hs	6	Alta. Diseño modular de 1,20 m	7	Media. Montaje modular, piezas de 200 kg	5	Alta. Materiales estandar	9	Alta. Piezas de 200 kg.	8	7,17

Ref.: Muy baja: 1-2; Baja: 3-4; Media: 5-6; Alta: 7-8; Muy alta: 9-10

Tabla 1: Matriz de evaluación de antecedentes sobre aspectos ponderados

1), se pudo instrumentar un criterio integral de evaluación incluyendo un análisis cuantitativo, ponderado y sistematizado. Teniendo en cuenta los requerimientos de climatización de los espacios productivos a abordar, se consideraron las tecnologías con mayor viabilidad. Los casos más aptos corresponden a los sistemas con acumulación por cambio de fase y con acumulación mixta (casos 5, 6 y 7 respectivamente). Los de cambio de fase, si bien obtuvieron una valoración favorable, la incidencia de sus costos y la baja accesibilidad en cuanto a sus materiales y proveedores genera desventajas respecto a las tecnologías mixtas (hormigón + agua). En cuanto a estas últimas, se observaron sólo algunas debilidades en cuanto al atributo “Factibilidad de armado/Montaje modular” dado el peso de cada pieza (200kg.).

En consecuencia, la tecnología que presentó mayores condiciones de adaptabilidad para los objetivos planteados, corresponde al sistema número 7, que incorpora la utilización de vainas con agua encerrada en bloques de hormigón industrializados. Esta opción, además de eliminar el problema del costo, también resuelve los inconvenientes de disponibilidad en mercado presentados por el antecedente anterior. Por otra parte evidenció una mejora de 7 puntos en cuanto a su eficiencia térmica (del 33% al 40%) en el análisis comparado contra un sistema de materialidad sólida (hormigón) (Discoli, Viegas, & San Juan, 2012). Consiguientemente, se orientó el trabajo a partir de un diseño en base a este antecedente (Sistema 7), manteniendo la materialidad; pero mejorando los atributos de armado/montaje modificando la modularidad (menor peso por pieza manipulada); versatilidad de aplicación, y diversidad de configuraciones; todos atributos planteados inicialmente en los objetivos de este trabajo.

ii. Diseño conceptual y técnico de los prototipos

Para el diseño de los prototipos específicos se consideró pertinente plantear una solución tecnológica modular de acumulación y amortiguación térmica compuesta por piezas solidas independientes (bloques manipulables en obra), y vainas estancas contenedoras del líquido (tubos con agua). Dicha tecnología debe ser armable in situ y adaptable a diferentes demandas térmicas y espaciales, haciéndolo muy versátil en su implementación. El objetivo es permitir su aplicación sobre múltiples espacios de uso productivo y/o humano, atendiendo a los requerimientos de climatización de cada caso y a múltiples configuraciones de armado. En cuanto a la aplicabilidad; contar con sistemas modulares con componentes industrializados, facilita el dimensionamiento del sistema y posteriormente las etapas de transporte e instalación. Se establecieron diferentes configuraciones de armado, desde muros ciegos, hasta la posibilidad de dejar los tubos expuestos. El sistema posibilita contar con mayor o menor masa sólida, modificando el retardo térmico según la cantidad de piezas de hormigón, dependiendo dicho retardo de los requerimientos de climatización del espacio productivo. Esto permite introducir una variable en las dinámicas de carga y descarga térmica, aportando a la versatilidad del sistema para ser adaptado a diferentes espacios y requerimientos. En la figura 2 se observan como ejemplo dos configuraciones del sistema de acumulación y dos variantes para su aplicación en un espacio productivo.

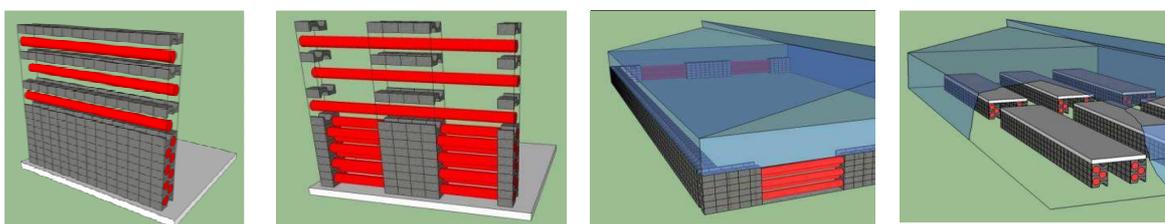


Figura 2: Diseño conceptual. Configuraciones y aplicaciones del sistema

En cuanto a la masa de hormigón se optó por realizar una pigmentación integral con negro de humo, tomando como antecedente el trabajo realizado por Discoli, Viegas y San Juan (2015). En el mismo, se estudiaron las propiedades termo-físicas del material pigmentado mediante ensayos sobre el mismo, así como su desempeño termodinámico al utilizarlo como componente de sistemas MAC.

Respecto a la incorporación de H₂O, se definió para contenerla el uso de tubos y tapas plásticas comerciales de 160 mm de diámetro (PVC o símil), conformando vainas estancas de diferentes tamaños. Los materiales son fácilmente adquiribles en el mercado dado que su uso es habitual en

instalaciones de desagüe pluvial o sanitario. Las mismas se llenan dejando un 2% del volumen de aire para absorber los cambios por dilatación térmica. Para el armado del sistema, las vainas se colocan intercaladas, en posición horizontal entre cada hilada de bloques (ver figura 2).

Para el diseño geométrico de las piezas sólidas (ver figura 3), se consideraron criterios en los que se incluyeron condicionantes como: espesores mínimos (resistencia del material); modularidad (altura de las piezas igual a un submúltiplo de la altura estándar de fachada), capacidad de carga térmica (relación hormigón / agua), retardo térmico (ubicación de la masa de agua en el espesor del muro), estándares constructivos en cuanto al espesor del muro (profundidad de la pieza) y ergonomía en el peso de cada pieza (limitando las dimensiones del bloque en su ancho).

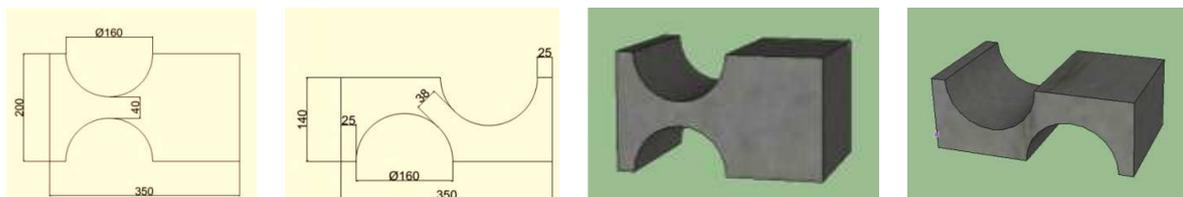


Figura 3: Plano y vista en 3D piezas

Se estudiaron diferentes variantes optimizando el diseño y realimentando el proceso con consultas a fabricantes de pre-moldeados a los efectos de lograr su viabilidad tecnológica en cuanto a su nivel de terminación, ajustes dimensionales en el ensamble y costos. Completada la etapa de diseño se encomendó a una empresa de pre-moldeados de hormigón (BLOCKY SRL), la fabricación de los moldes y de la cantidad de bloques necesarios para la realización de los ensayos en hormigón H30⁶ pigmentado. El diseño y construcción de los sistemas se llevaron a cabo en el marco de los proyectos PITAP (Proyecto especial de Innovación y Transferencia en Áreas Prioritarias) Financiado por la Universidad Nacional de La Plata⁷, y PIP 097 (Proyecto de Investigación Plurianual) financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina, CONICET⁸. La tabla 2 muestra cuantitativamente las características termo - físicas del sistema. La información descripta (dimensiones de las piezas, peso y cantidad de piezas por metro cuadrado, y capacidad calorífica volumétrica) permite un dimensionamiento básico del sistema. Los valores por unidad de superficie, están orientados al dimensionamiento de muros, mientras que los valores volumétricos, responden al dimensionamiento de acumuladores / inercialores. Así mismo, numéricamente se advierte la diferencia entre ambos prototipos, observando que el diseño “dosbolillo” cuenta con el mayor volumen relativo de agua, y posibilita sistemas con mayor capacidad calorífica volumétrica. En la figura 4 se muestran las piezas finales obtenidas y un ejemplo de configuración del sistema de “tubo simple”.

Características geométricas y físicas			
	Tubo Simple		Dosbolillo
			
Diámetro de tubos (mm)	160		160
Profundidad (espesor de muro) (mm)	350		350
Altura (mm)	200		140
Ancho de pieza (mm)	200		200
Bloques en modulación de 2,4 m	12		17
% V/V de H2O	29%		41%
Peso estimado (kg/m ²)	649,36		597,66
Densidad estimada (kg/m ³)	1855,31		1707,60
Volumen de agua (l/m ²)	100,53		143,62
Volumen de agua (l/m ³)	287,23		410,34

⁶ Hormigón H30 significa hormigón con resistencia característica a los 28 días de 300 Kg/cm².

⁷ “Producción social del hábitat sustentable (PSHs)”. Convocatoria a Proyectos de Investigación y Traserferencia en Áreas Prioritarias (PITAP) /UNLP 2013. Director: Dr. Gustavo San Juan. 2015/2017.

⁸ “Desarrollo de tecnologías y pautas de reciclado masivo de la envolvente edilicia residencial orientado al uso racional y eficiente de la energía en áreas urbanas” 2014/2016 (Director: Dr. Carlos Discoli, Co-Director: Dra. Irene Martini).

Volumen de hormigón (litros)	9,98	5,78
Peso por pieza (teórico) (kg)	21,95	12,71
Piezas / m ² de muro	25,0	35,7
Capacidad Calorífica/m ² de muro(kJ/m ² K)	925,75	1018,90
Capacidad Calorífica volumétrica (kJ/m ³ K)	2644,99	2911,13

Tabla 2: Especificaciones del sistema en sus dos versiones

iii. Ensayo del sistema acumulador/amortiguador

A partir de los prototipos planteados, este trabajo presenta los primeros ensayos del sistema “tubo simple”, el cual es incorporado a un espacio productivo tipo invernadero. Como se ha expresado antes, este tipo de espacios tienen por característica una muy baja inercia térmica, alcanzando temperaturas pico, principalmente de enfriamiento, que llegan a ser dañinas para los cultivos. La inclusión del sistema pretende incrementar la inercia térmica del espacio, amortiguando los cambios de temperatura entre los ciclos diurno y nocturno.

El invernadero se resolvió a través de un box de ensayo con una estructura metálica liviana y una película de polietileno tipo LD (sin tratamiento para retención de la radiación infrarroja) de 200 micrones de espesor, de utilización típica en el cordón agro-productivo del Gran La Plata. Cuenta con un área cubierta de 9 m², con una envolvente de 31,8m². El Factor de Área Envolvente/Piso (FAEP) verifica un valor de 3,53 m²/m², similar a los valores estándar en invernaderos de tamaño pequeño y mediano (Esteves, Gelardi, & Oliva, 1997) (Esteves & Gelardi, 1999).

El ensayo se realizó en dos etapas sucesivas durante el mes de agosto de 2016, en ciclos de 10 días por etapa, midiéndose primero una situación de base con el invernadero sin masa térmica y luego incorporando el sistema mixto (ver figura 4). La tabla 3 indica los valores de masa y capacidad calorífica incorporados al espacio, conformando un total de 864 kg de masa y una capacidad calorífica de 1579 kJ/kg.

<i>Configuración del sistema ensayado</i>			
Hormigón [bloques]	26	Agua [tubos]	6
Masa [kg]	624	Masa [kg]	240
Capacidad calorífica [kJ/K]	574	Capacidad calorífica [kJ/K]	1005

Tabla 3: Sistema planteado para el ensayo

Concretadas las etapas del ensayo, se sistematizaron los datos climáticos y la irradiación solar diaria durante el periodo. Se seleccionaron para el análisis los días con niveles de irradiación diaria mayores al 80 % del máximo registrado en el periodo de realización del ensayo. Luego a partir de los datos de temperaturas y radiación se realizó un análisis comparado entre la situación Base (invernadero vacío) y las alternativas propuestas. Finalmente se analizaron los resultados.



Figura 4: Piezas de “tubo simple”, vista general del sistema armado y detalle de la instrumentación.

El gráfico 1 muestra los estados térmicos y la irradiación del invernadero vacío y del invernadero cargado con el sistema mixto. En línea de puntos se observan las temperaturas exterior e interior y la irradiación en el ensayo de la situación base, y en línea continua la irradiación y las temperaturas del invernadero y del sistema mixto (temperatura de bloques y vainas de agua).

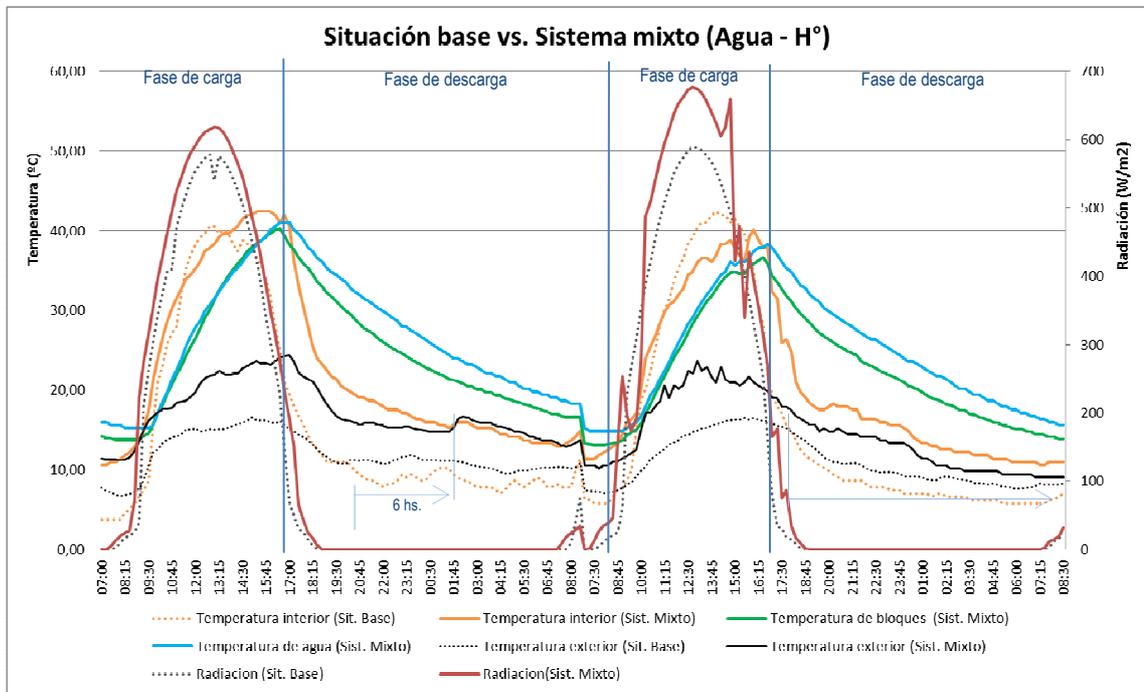


Gráfico 1: Situación Base vs. Sistema Mixto

En cuanto al comportamiento de carga-descarga del sistema, se observa que la fase de carga comienza dos horas después del amanecer, en el momento en que el invernadero comienza a recibir irradiación solar directa. Dicho proceso se sostiene mientras continúa esta condición, hasta las 16:30 hs. Luego comienza la fase de descarga en la que ocurre el aporte térmico del sistema hasta el comienzo de un nuevo ciclo.

En la fase de carga del invernadero con sistema Mixto (Agua-Hormigón), se advierte una disminución en la pendiente de la curva de temperatura de aire interior. El valor de pico se registró con un retardo de unas dos horas respecto a la situación Base. La carga del sistema continuó durante algunos minutos más, incorporando calor aun en el comienzo del enfriamiento interior (intersección entre las curvas de temperatura interior y temperaturas del sistema). En la fase de descarga, la temperatura del invernadero evoluciona en ambos casos con una mayor pendiente (decreciente) en su comienzo, pasando luego a una etapa de “valle”, con menor variación durante el periodo nocturno. En las curvas de temperatura del sistema (bloques y agua) se aprecia una dinámica estable con leves variaciones en su pendiente, permitiendo sostener el aporte térmico durante todo el periodo nocturno.

El aporte térmico total, correspondiente a los bloques sólidos y las vainas con agua encriptada, fue de 36,52 y 35,92 MJ en el primer y segundo día respectivamente. Su interacción con el medio se evidencia en el proceso de carga y descarga, situación que se registra en las curvas de temperatura de bloques y de agua (curvas verde y celeste), y en el efecto de retardo y amortiguamiento térmico de la temperatura de aire interior (curva naranja).

Por otra parte, se observa que luego del ocaso, en el caso de la situación base, la temperatura interior desciende por debajo de la exterior manteniéndose esta relación durante toda la fase nocturna. Este fenómeno de “inversión térmica” se encuentra asociado a las características del polietileno utilizado (tipo LD sin filtro para la radiación infrarroja), y a la consiguiente emisión radiativa hacia la atmósfera durante el periodo nocturno. Con la incorporación del sistema, se advierte su aparición en el primer ciclo comparado, con un retardo de aproximadamente 6 hs. respecto a la situación base; mientras que en el segundo ciclo, no se registró dicho fenómeno. Se observa además, que su aparición en el primer ciclo está fuertemente determinada por un incremento repentino de la temperatura exterior alrededor de las 2:00 hs. Al revisar los datos de la estación meteorológica, se verifica la causa del mismo en la aparición de ráfagas de viento cálido del norte con velocidades de entre 10 y 15 km/h registradas a partir de la 1:30 hs.

A los efectos de compatibilizar y poder normalizar el análisis comparado, dado que los días de ensayos no reproducen exactamente los mismos parámetros climáticos (temperatura exterior e

irradiancia) entre una medición y la subsiguiente, se trabajó también con una variable indirecta de temperatura relativa definida como:

$$T_r(\%) = T_{int}/T_{ext} \cdot 100 \%$$

Dónde: T_{int} corresponde a la temperatura del aire interior del recinto
 T_{ext} a la temperatura ambiente exterior.

El gráfico 2 presenta el mismo ensayo comparando la situación Base y el sistema Mixto incorporando en ambos casos la temperatura relativa T_r .

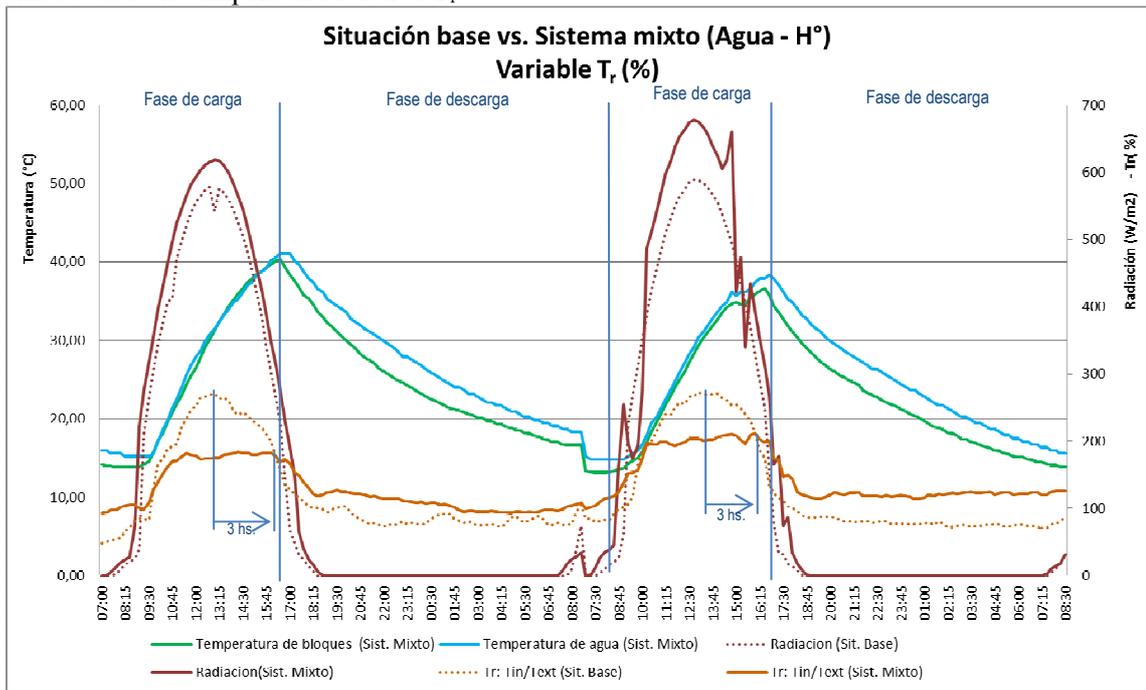


Gráfico 2: Situación Base vs. Sistema de materialidad Mixta

Durante la fase de carga, se observan en la variable T_r , un retardo medio de tres horas y una disminución o amortiguamiento de entre el 70% y el 90% sobre la situación de “pico”, evitando el sobrecalentamiento del invernáculo. Al iniciar la fase de descarga, se observa que el sistema estabiliza la temperatura relativa T_r respecto de la situación base, sosteniendo el nivel térmico del ambiente durante toda la fase nocturna. Gráficamente, esto se advierte en la diferencia de T_r en ambos sistemas (Sist. Base y Sist. Mixto), correspondiendo un incremento medio de entre el 25 y el 30% que se mantiene hasta el nuevo inicio del ciclo de trabajo. Así mismo la temperatura relativa media del aire interior registró un incremento del 12% con la incorporación del sistema mixto.

En cuanto a la dinámica de carga y descarga del sistema Mixto, se observa que al comparar las pendientes de las curvas de temperatura de ambos materiales (bloques de hormigón y vainas con agua), son similares. Durante la fase de carga, si bien las curvas están prácticamente superpuestas, la masa líquida alcanza una mayor temperatura final (entre 1 y 2°C). En la descarga, si bien las diferencias son mayores, los bloques de hormigón y las vainas de agua intercambian calor al ambiente manteniendo su diferencia incremental bajo una misma pendiente media.

Cuando el sistema se encuentra en régimen, luego de un ciclo de trabajo en un día soleado, el aporte térmico neto disponible es de 36,22 MJ, sosteniendo en el tiempo una mayor temperatura relativa interior/exterior (T_r) durante la fase nocturna. Luego de la descarga transcurrida durante el periodo nocturno se observa una cantidad de energía remanente. Dicha carga térmica (de unos 6,28 MJ) es utilizada durante las primeras horas de un día nublado con predominancia de radiación difusa.

CONCLUSIONES

El trabajo permitió el desarrollo de un sistema solar pasivo industrializable y de configuración versátil, orientado a satisfacer requerimientos de climatización y/o estabilización térmica de espacios de uso productivos. El análisis de antecedentes y la implementación de una matriz de valoración de atributos, permitió evaluar las tecnologías con mayor viabilidad en función de la diversidad de los espacios productivos a abordar. Dicha instrumentación resultó una herramienta útil y rápida para ponderar fortalezas y debilidades a tener en cuenta en el diseño de nuevos sistemas.

La metodología de abordaje permitió establecer un proceso de diseño final del sistema, mejorando los atributos de armado/montaje y modularidad; versatilidad de aplicación y diversidad de configuraciones; todas propiedades planteadas inicialmente en los objetivos de este trabajo.

Se caracterizaron los sistemas y sus componentes estableciendo características termo-físicas y geométricas. Se llevó a cabo una transferencia al medio productivo a través de la interacción con una empresa de pre-moldeados de hormigón, en la que se desarrollaron los moldes y se fabricaron las piezas en hormigón vibrado (H30) de manera industrializada para su posterior replicabilidad.

Los ensayos se implementaron en un BOX reproduciendo un invernadero, estableciendo un análisis entre una Situación de Base, evaluando el invernadero sin ningún tipo de masa de acumulación de calor y con el sistema Mixto (hormigón y agua tratada), incorporando una masa térmica total de 864 kg. El ensayo realizado permitió efectuar la evaluación de desempeño y el estudio del comportamiento del sistema mixto seleccionado. El mismo demostró buena eficacia para el amortiguamiento térmico de este tipo de espacios productivos, estabilizando el ambiente en una temperatura relativa (interior/exterior) durante el periodo nocturno, entre un 25 y 30 % superior a la situación en vacío, y evitando la inversión térmica de frecuente aparición en noches de cielo despejado.

El aporte térmico medio neto durante el periodo nocturno se cuantificó en 36,22 MJ. Dicho aporte, evita el uso total o parcial de otros sistemas convencionales de climatización minimizando costos de producción. Además, su temperatura residual al finalizar dicho período, dispone de una cantidad de energía remanente aprovechable en las primeras horas de una eventual mañana con cielo nublado.

A su vez, la dinámica de carga/descarga del sistema permitió sostener el ambiente a partir del aporte térmico durante todo el período nocturno, amortiguando a su vez los picos diurnos en la temperatura del aire interior del invernadero. Durante el período diurno, con el sistema Mixto, fue registrada una estabilización de la temperatura interior con una disminución en el valor de "pico" que alcanzó un 90%, en la variable de temperatura relativa interior/exterior. Este aspecto resulta de especial interés al permitir proteger los cultivos de daños por altas temperaturas sin necesidad de ventilar, al tiempo que se acumula dicho calor para ser liberado en la fase nocturna.

En síntesis, el trabajo demostró la viabilidad tecnológica del sistema propuesto, dando respuesta térmica y de climatización en los espacios de producción. Se consideran alcanzados los objetivos del presente trabajo, obteniéndose un prototipo que demuestra empíricamente su utilidad para esta aplicación, y se prevé continuar con los ensayos del sistema en su aplicación como muro acumulador de calor (MAC) y en otras configuraciones dentro de espacios productivos.

REFERENCIAS

- Alanis, Saravia, Lesino (1978). Material de alto calor específico para muro Trombe-Michel. Actas de 4ta. Reunión de trabajo de ASADES, La Plata. Pp 241-248.
- Alanis, Saravia, Lesino (1978). Propiedades térmicas y ensayo de materiales para acumulación. Actas de 5ta. Reunión de trabajo de ASADES, Córdoba. Pp 67-99.
- Balcomb, D.; Hedstrom, J.C. (1980). Determining Heat Fluxes from Temperature Measurements in Massive Walls. The 5th National Passive Solar Conference. Amherst, MA, October 19-26.
- Balcomb, J.D (1981). Chapter 16. Passive solar energy system for buildings. Solar Energy Handbook ISBN 0-07-035474-X. New York, USA.
- Balcomb, J.D., Barker, G., Hancock, C.E. (1998). An Exemplary Building Case Study of the Grand Canyon South Rim Residence. NREL/TP-550-24767, Golden, Colorado, USA.

- Bistoni, S., Iriarte, A., & Saravia, L. (2004). Colector de aire con acumulador de agua para calefacción de invernaderos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2.25-2.30.
- Bourdeau, L., Jaffrin, A., & Moïsam, A. (1980). Capitage et stockage d'énergie solaire dans l'habitat par le moyen de mur diode à chaleur latente. *Revue de Physique Appliquée*, 15(3) 559-568.
- Discoli y Rosenfeld (1986). Muro colector acumulador en agua: módulos industrializables de bajo costo. *Actas 11ª Reunión de Trabajo de ASADES*, San Luis, pp. 77-84.
- Discoli, C., Viegas, G., & San Juan, G. (2011). Viviendas bioclimáticas en Tapalqué. Sistema de climatización por muros acumuladores de calor (MAC). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, pp. 5.75-5.82.
- Discoli, C., Viegas, G., & San Juan, G. (2012). IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES.
- Discoli, Guerrero, Rosenfeld, Ravella (1985). Muro colector acumulador en agua: su comportamiento en la zona templada-húmeda. *Actas 10ª Reunión de Trabajo de ASADES*, Neuquén, pp. 15-22
- Discoli, San Juan (2010). Muro climatizador Acumulador de Calor Mixto con vainas líquidas estancas. IMPI 20110100010, Oficina de patentes de CONICET
- Discoli, Viegas, Modelo de aplicación presentado a la Oficina de Vinculación Tecnológica del CONICET. Trámite iniciado en 2014.
- Divecchia, V., Rosselli, D., Ruggi (1979). Low and médium Temperature heat storage for solar application. Pag. 473. *Energia solare e nuove prospettive*, Atti de la 18ª Conferenza Intl. Milano.
- Edward S. Morse (1881). Warming and ventilating appartements by the sun's rays. Unate States Patent Office. Specification forming part of Letters Patent N°246.626, 1881. Salem, Massachusetts
- Esteves, A., & Gelardi, D. (1999). Muro de botellas de PET para incrementar la inercia termica en invernaderos para cultivos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9.3.
- Esteves, A., Gelardi, D., & Oliva, A. (1997). The Shape in the Bioclimatic Architecture: The FAEP Factor. *Proceedings of II Conf. Teachers in Architecture*, (pág. cap. 3.12). Florencia, Italia.
- Guerrero, Discoli, Rosenfeld, Ravella, Ferreyro (1984), Prototipo experimental de La Plata: Primera campaña de ensayos de habitabilidad y comportamiento energético. *Actas de 9na. Reunión de trabajo de ASADES*, San Juan. Pp 113,120
- Guerrero, Rosenfeld, Ravella, J. R. del Cueto (1979). Muro colector acumulador para el programa CESAD. *Actas 5ta. Reunión de trabajo de ASADES*, pag 491-499. Córdoba, Argentina.
- Juanicó, L., Piacentini, R., & La Mattina, G. (2011). Desarrollo de invernaderos con sistema sustentable de confort térmico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3.01-3.08.
- Li-Hong, G., Mei, Q., Hua-Zhong, R., Xiao-Lei, S., Qing-Yun, C., & Zhen-Xian, Z. (2010). Structure, Function, Application, and Ecological Benefit of a Single-slope, Energy-efficient Solar Greenhouse in China. *Hort Technology*, June 2010 (20-3) 626-631.
- Suárez, H. (2012). Invernadero con acondicionamiento térmico solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 08.167-08.172.
- Urriol, Gaspar (1980). Sistema de ensayo comparativo de muros colectores-acumuladores y simulación de un muro homogéneo. *Actas de 6ta. Reunión de ASADES*, Catamarca. Pp 247-272.
- Zalewski, L., Joulin, A., Lassue, S., Dutil, Y., & Rousse, D. (2012). Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material. *Solar Energy*, 208-219.

ABSTRACT:

This work exposes the development of a solar thermic accumulator / damper system. It is a modular passive system oriented to satisfy requirements of air conditioning and /or thermal stabilization for human / productive use spaces. Background study, design process, prototypes development are shown. Constructive components, geometries and materials are described. The results of performance tests of the system applied in a greenhouse in outdoor laboratory are presented. They showed favorable thermal behavior, registering a reduction in the thermal amplitude within the greenhouse space, in comparison with the reference situation. Diurnal heating peaks were diminished, stabilizing average indoor temperature and nocturnal thermal inversion phenomenon was avoided.

Key words: renewable energy, passive solar systems, thermic buffer, heat storage system, greenhouse