

## **DESARROLLO DE INVERNADEROS CON SISTEMA SUSTENTABLE DE CONFORT TÉRMICO**

**L.E. Juanicó<sup>1</sup>, R. Piacentini<sup>2</sup> y G. La Mattina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro Atómico Bariloche, <sup>2</sup> Univ. Nac. de Rosario  
C.P.8400 – Bariloche, R. Negro

Tel. 02944-445100 – Fax 02944-445299; e-mail: juanico@cab.cnea.gov.ar

**RESUMEN:** Se presenta un diseño original de un sistema sustentable para mejorar el confort térmico de invernaderos, que permitiría extender el uso de éstos para climas fríos o de gran amplitud térmica, en los cuales el riesgo de heladas limita seriamente su uso. Se analiza el diseño termo-hidráulico, de ganancia solar y de costos del mismo, demostrándose que el sistema propuesto podría ser de muy bajo consumo energético y baja inversión inicial, además de técnicamente factible. El bajísimo consumo de la bomba de agua lo vuelve muy adecuado para su uso en locaciones remotas sin red eléctrica.

**Palabras clave:** energía solar, arquitectura solar, invernaderos, colectores solares térmicos

### **INTRODUCCIÓN**

Es ampliamente conocido el uso de invernaderos para, a través del efecto del cual toman su nombre, aumentar la ganancia solar y por ende la temperatura en su hábitat. De esta forma se logra viabilizar y/o acelerar la producción de diversas especies vegetales de climas más cálidos. Desde el punto de vista social, podemos señalar que el cultivo de diversos vegetales bajo invernadero es una herramienta notable para extender la sustentabilidad del Hombre en locaciones de clima frío (como la Patagonia) y/o de gran amplitud térmica (como la Puna). Siendo esto ampliamente reconocido, sin embargo el alto riesgo de aparición de heladas nocturnas limita fuertemente en estos casos su uso.

Desde el punto de vista de la arquitectura solar, podemos señalar que la principal desventaja de los invernaderos a estos efectos es su bajísima inercia térmica. Por este motivo, la gran ganancia solar obtenida durante el ciclo diurno no se acumula en la estructura, dando paso a un rápido descenso de la temperatura durante la tarde-noche, llegándose a peligrosas heladas que pueden exterminar la producción vegetal. Es pertinente también mencionar el perjuicio del gran sobrecalentamiento diurno; siendo perjudicial para la producción, obliga en el invernadero tradicional a efectuar distinto tipo de acciones, de importantes sobrecostos y/o consumos energéticos asociados. Entre las estrategias más frecuentes para estos efectos podemos mencionar: 1) instalar potentes ventiladores y vaporizadores; 2) extender toldos media-sombra; 3) utilizar un diseño de invernadero de gran altura, para producir la clásica “bizona”, donde se separa la zona sobrecalentada superior de la inferior donde se ubica la producción vegetal. Estas estrategias implican así el uso de sistemas activos de gran consumo energético en el primer caso, o pasivos en los restantes casos, que implican un importante sobrecosto. Costos del toldo y de dos efectos originados en una estructura de mayor altura respecto de otra baja: la superficie de la cubierta transparente es mayor, y siendo que se ofrece de este modo una mayor superficie al viento, por ende se debe reforzar la estructura soporte.

Por todo lo anterior es que el uso masivo de invernaderos se ve fuertemente restringido en locaciones de climas fríos y/o de gran amplitud térmica, sobre todo atendiendo a su fin social. Mientras los empresarios pueden invertir fuertes sumas para construir grandes invernaderos que cuentan con distintos tipos de actuadores (ventiladores, calefactores a gas o eléctricos, etc.), todas estas alternativas convencionales quedan fuera de las posibilidades reales del poblador periurbano y rural medio.

Esta misma temática ha sido motivo de importantes estudios realizados desde hace veinte años por otros colegas. En particular, debemos mencionar aquí, por ser un diseño cercano al nuestro y que nos ha servido de inspiración, el trabajo realizado en el centro tecnológico INENCO en Salta desde hace 20 años. Allí, se ha experimentado con éxito el uso de sistemas pasivos de acumulación de agua, utilizando bolsas plásticas de bajo costo colgadas del techo como método de aumentar la inercia térmica del invernadero, y de esta forma suavizar el descenso de temperatura nocturno (Suárez y Saravia, 1998). La experiencia del INENCO demostraba la utilidad de estos sistemas pasivos cuando los descensos de temperatura durante el ciclo nocturno no eran muy pronunciados. Entre sus limitaciones podemos citar: 1) el costo del sistema en si era bajo, pero (colgadas del techo) generaban una carga adicional considerable sobre la estructura, lo cual se traducía en sobrecostos importantes de ésta, y en cambio apoyaban sobre el piso, las bolsas de agua ocupaban una apreciable área útil; 2) las bolsas de agua perdían calor durante todo el ciclo nocturno, restando un nivel remanente mínimo para el momento de máxima demanda, cercano a la madrugada, que es precisamente cuando se presentan las heladas (Suárez y Saravia, 1998; Bistoni et al., 2004; Saravia et al., 1997).

Lo anterior no debería extrañar. Los sistemas pasivos de acumulación de la ganancia solar en forma de energía térmica mediante reservorios de agua han sido tradicionalmente empleados en la arquitectura solar, tales como el Muro Trombe. Sus ventajas son el bajo costo y sencillez de los reservorios y también su alta compacidad, derivada de la enorme capacidad calorífica del agua. Presenta sin embargo dos desventajas fundamentales, que han limitado en la práctica su uso a los casos conocidos de muros soleados en viviendas, con un éxito moderado: 1) siendo (en la forma de un tanque) sistemas muy compactos, por ese motivo la superficie de captación y de liberación del calor, es también baja, y de allí la tasa de transferencia de calor es baja; 2) siendo un sistema pasivo, la liberación de calor hacia la vivienda se da siguiendo una curva

temporal opuesta a la óptima: cuando llega la madrugada y se necesita maximizar el aporte de calor, el sistema se encuentra en su mínimo nivel por haber perdido energía durante todo el ciclo de descenso de temperatura vespertino y nocturno. El sistema desarrollado en el INENCO ha mejorado ciertamente la primera de las limitaciones anteriores, pero siendo un sistema pasivo, no puede remediar la segunda. Respecto a este último concepto, cabe mencionar que en los últimos años han sido propuestos un número cada vez más significativo de sistemas activos de arquitectura solar, quizás como consecuencia del notable desarrollo de la electrónica y en particular de los sistemas micro-controlados de automatización de procesos, actualmente de muy bajo costo. Así, por ejemplo, podemos citar aquí como antecedentes relevantes, los diseños automatizables de toldos móviles configurables de Juanicó (2009) y Fernández-González (2005) y de colectores solares integrados al techo de Juanicó (2008, 2010) y de Baer (2002) y también el histórico Skytherm (Hay, 1977, 1969).

Como un antecedente directo debemos considerar el techo solar “de agua” de Juanicó (2008 y 2010). Este utiliza un gran inventario de agua móvil para: 1) coleccionar la ganancia solar diurna del techo, calentando el mismo a moderadas temperaturas, 2) almacenarla en la tarde en un gran tanque aislado, 3) utilizarlo este inventario de agua caliente durante la noche a través de un circuito de losa radiante para calefaccionar la vivienda. Sintetizando este diseño, podemos decir que su innovación radica en que moviendo sólo agua, se logra: captar, almacenar, y entregar energía térmica a lo largo del ciclo diario, en los intervalos temporales y según la distribución espacial más conveniente. Basados en las tecnologías modernas de cañerías plásticas flexibles de bajo costo y de bombas de agua de bajo costo, podemos construir estos sistemas con costos moderados, y empleando tecnologías simples, universales y al alcance del usuario medio.

En este trabajo se presenta por primera vez este nuevo diseño universal que provee confort térmico en invernaderos, que sigue los conceptos generales del techo solar anterior. Nuestra aspiración es que el mismo se utilice y expanda masivamente a nivel mundial, para lo cual hemos decidido no patentar el mismo, y sí darlo a conocer públicamente aquí. La Figura 1 muestra un esquema general del sistema propuesto, basado en dos intercambiadores de calor construidos con manguera flexible conectados a un gran tanque de agua. El primer intercambiador colgado del techo (ver Fig.2), absorbe el sobrecalentamiento diurno y lo transfiere hacia el tanque reservorio en donde se almacena durante la tarde y noche mientras desciende la temperatura dentro del invernadero hasta que se llega a un nivel crítico. Entonces, mediante una bomba de agua se recircula por el segundo serpentín este inventario de agua calentada, ubicado a nivel del suelo y próximo a los cultivos. Se logra así suavizar los efectos muy perjudiciales de las heladas, y colateralmente, reducir el sobrecalentamiento diurno.



Figura 1. Esquema general del sistema.

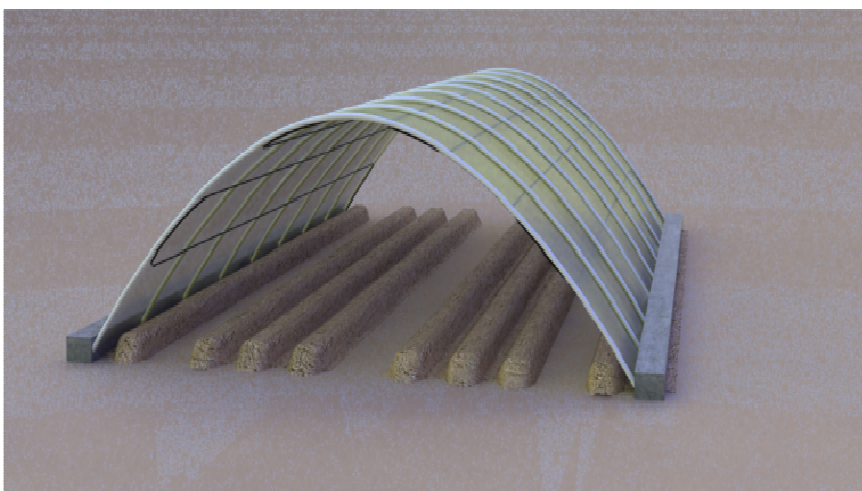


Figura 2. Ilustración del serpentín superior adosado a la estructura.

## DESARROLLO TEÓRICO TÉRMICO E HIDRÁULICO

### Ganancia Solar Térmica

Para poder estimar el rendimiento posible del sistema activo acumulador de ganancia solar, es necesario considerar en primer lugar el balance solar térmico general del invernadero, a fin de estimar la energía que estará disponible para el sistema captador de calor, ya que en resumidas cuentas, el invernadero propuesto estará trabajando como un colector solar de baja temperatura adosado a un gran tanque acumulador.

La ganancia solar obtenida en un invernadero es función directa del área de captación (superficie de implantación) y del recurso solar disponible in situ. Siendo este último altamente variable, utilizaremos en este análisis valores promedios mensuales de irradiación solar diaria para los meses invernales, en una locación específica de la Patagonia (Bariloche). Según el mapa nacional (Righini et al., 2005) se observa para Bariloche un promedio de 1.5 kWh/m<sup>2</sup> en junio-julio.

Consideraremos a todos los efectos, un área de implantación del invernadero de 50m<sup>2</sup>, obtenida en este ejemplo en un invernadero típico parabólico de 4m de ancho de base construido con una estructura de caños plásticos de PVC de 40mm de diámetro, que brindan adecuada rigidez y flexibilidad, anclados en sus extremos a una hilera de bloques de cemento, empleados también a efectos de “anclar” la cubierta transparente (el típico etileno “amarillo” con filtro en el IR).

La ganancia solar del invernadero será función de las condiciones ambientales, siendo la preponderante (al igual que en todo colector solar térmico) el salto de temperaturas entre la temperatura exterior e interior del invernadero. La ganancia óptica de un invernadero con cubierta simple (eficiencia máxima, sin pérdidas térmicas) es muy alta, alcanzando el 80%, pero las pérdidas de calor (directamente proporcionales al sobrecalentamiento del interior respecto al medioambiente) la hacen caer al 50% para un salto de 20 a 30 grados centígrados. Aquí se observa la primera ventaja del uso de un sistema interior acumulador de calor, de cualquier tipo: al reducirse dramáticamente el sobrecalentamiento interior (ya que la energía solar captada se almacena en la masa de agua adicionada), se reducen las pérdidas, y la eficiencia mejora. Se puede estimar de curvas standard para colectores de cubierta transparente simple, que para un salto de temperatura entre el colector y el ambiente de 20°C, la eficiencia global obtenida puede estimarse en 50% o más, pero conservativamente tomaremos aquí 35% (Condorí, 1998 y 1999), siendo que deben considerarse otras pérdidas propias del invernadero tales como la absorción de calor en las plantas. De aquí, estimamos la energía diaria acumulada por el invernadero del ciclo diurno,  $E_d$ , como:

$$E_d = I \times A \times 35\% = 26.3 \text{ kWh} \quad (1)$$

### Modelado térmico del intercambiador

Debe diseñarse el sistema intercambiador de calor aire-agua de modo que su tasa de transferencia de absorción de calor sea suficiente para absorber una fracción importante de  $E_d$ , calculada antes. Se propone aquí un diseño de intercambiador de calor de máxima sencillez, el cual consiste de dos líneas plásticas continuas de gran longitud, en base a manguera de 3/4" negras de riego común de polietileno, longitudinalmente colgadas de la estructura parabólica soporte, a diferentes alturas, desde un tramo inferior hasta uno de máxima altura, ubicado en el eje central del techo. De esta manera la circulación de agua (fría) desde el tanque reservorio le permitirá ser precalentada en las zonas bajas de menor temperatura hasta alcanzar la máxima temperatura de salida en la altura máxima de mayor temperatura. El uso de dos líneas paralelas (que suben desde ambas extremos de la parábola hacia el centro) permite así evitar que luego de alcanzar su mayor temperatura, el flujo de agua devuelva calor al circular en la zona baja, más fría, lo cual favorece la convección natural (por termosifón) hacia el tanque de agua, ubicado por sobre el invernadero. Otra ventaja de este esquema, es que al separar el flujo en dos líneas paralelas, las pérdidas hidráulicas de presión del circuito se reducen casi cuatro veces (para flujo turbulento), y de este modo, se reduce igualmente el consumo de la bomba, el cual será luego estudiado.

El coeficiente global de conducción de calor ( $U$ ) se puede estimar considerando tres resistencias térmicas en serie (Incropera, 2007): de conducción a través de la pared (de espesor  $e$  y conductividad térmica  $k$ ) de la manguera,  $e/k$ , y de convección libre con el aire invernadero,  $1/h_e$ , y de convección forzada en el flujo de agua,  $1/h_i$ , como:

$$1/U = 1/h_e + e/k + 1/h_i \quad (2)$$

Valores típicos de bibliografía, muestran que un valor conservativo del coeficiente de convección para un flujo de aire en reposo,  $h_e = 10 \text{ W/m}^2\text{C}$ , mientras que  $h_i$  (para flujo forzado de agua), puede alcanzar fácilmente  $100 \text{ W/m}^2\text{C}$ , al igual que  $k/e$ . Por lo tanto, es usual en este tipo de cálculos despreciar conservativamente las dos últimas resistencias térmicas, siendo  $h_e$  la equivalente. En este caso vale entonces:

$$U \sim h_e = 10 \text{ W/m}^2\text{C} \quad (3)$$

La potencia absorbida por el intercambiador desde el invernadero, se expresa como:

$$Q = U A \Delta T_m \quad (4)$$

Donde  $\Delta T_m$  es el salto de temperatura logarítmico medio, entre la temperatura  $T_a$ , (constante) del invernadero y la temperatura de entrada  $T_e$ , y de salida,  $T_s$ , del circuito, calculado como:

$$\Delta T_m = (\Delta T_e - \Delta T_s) / \log (\Delta T_e / \Delta T_s) \quad (5)$$

Siendo a su vez, el salto de temperatura en el flujo de agua del intercambiador obtenido por el balance de energía para el mismo, planteado a partir del caudal de circulación,  $m'$  (kg/s) y la capacidad calorífica del agua, como:

$$Q = m' C_p (T_s - T_e) \quad (6)$$

El conjunto de las seis ecuaciones anteriores permite calcular la potencia transferida y la temperatura de salida del intercambiador,  $T_s$ , para una determinado par de temperaturas  $T_e$  y  $T_a$  del invernadero constantes (siendo  $T_e$  igual a la temperatura del tanque). Integrara en un determinado período  $t$  esta potencia  $Q$ , el balance de energía para el tanque reservorio de masa  $M$ , permitiría despejar la temperatura final que alcanzaría el reservorio:

$$Q t = E = M C_p (T_{final} - T_{inicial}) \quad (7)$$

Similarmente se puede modelar el intercambiador de calor ubicado en el piso, utilizado durante la noche para calefaccionar el invernadero desde su base.

#### Modelado hidráulico del intercambiador

Las pérdidas hidráulicas del circuito son función de las fricciones distribuidas a lo largo de la larguísima cañería, y se balancean con el salto de presión impuesto por la bomba recirculadora del circuito,  $\Delta p$ . El balance de momento sobre el flujo es (despreciando el término de las pérdidas concentradas en curvas, despreciables frente a las pérdidas distribuidas) entonces:

$$\Delta p = \frac{1}{2} f (L/D) \rho V^2 \quad (8)$$

donde  $f$  es el coeficiente de Darcy de fricción distribuida, que se puede estimar como:

$$f = 64/Re \quad (si Re < 5 \cdot 10^3) \quad (9.1)$$

$$f = 0,31 Re^{-0,25} \quad (si 5 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^4) \quad (9.2)$$

$$f = 0,184 Re^{-0,2} \quad (si Re > 2 \cdot 10^4) \quad (9.3)$$

siendo  $Re$  el número de Reynolds del flujo:

$$Re = D \rho V / \mu \quad (10)$$

donde  $\mu$  y  $\rho$  son la viscosidad y densidad del agua, respectivamente,  $D$  el diámetro hidráulico y  $V$  su velocidad promedio. El conjunto de ecuaciones anteriores permiten determinar la caída de presión en función del caudal de circulación:

$$Q = V A_{xs} \quad (11)$$

donde  $A_{xs}$  es el área de pasaje hidráulica. Se puede calcular la potencia de bombeo como:

$$\text{Potencia bombeo} = \Delta p Q \Pi \quad (12)$$

siendo  $\Pi$  la eficiencia de la bomba (típicamente superior al 90%). Durante el ciclo nocturno, se utiliza un intercambiador de calor para liberar la energía térmica del inventario calentado durante el ciclo diurno. Lo interesante de este sistema activo, es el poder seleccionar el momento justo para calefaccionar el invernadero y así optimizar su rendimiento, simplemente encendiendo la bomba. Se puede utilizar un mecanismo simple para ello, por ejemplo que encienda la bomba a cierto horario, o se pueden utilizar toda una batería de sistemas automáticos inteligentes, por ejemplo monitoreando la temperatura del invernadero, cuando ésta descienda por debajo de cierto umbral predefinido de peligro, por ejemplo, 5°C.

#### Modelado térmico del intercambiador en ciclo nocturno

La potencia de calefacción provista por el sistema nocturno debe mantener la temperatura dentro del invernadero a 5°C, cuando la exterior descienda a -15°C. Empleando igualmente un esquema de resistencias térmicas en serie, podemos estimar ahora el coeficiente de convección libre dentro del invernadero en 10W/m<sup>2</sup>C, y de 20W/m<sup>2</sup>C el exterior; despreciando la resistencia de conducción a través de la delgada cubierta plástica, obtenemos un coeficiente global  $U = 7,5$  W/m<sup>2</sup>C. La potencia perdida para mantener un salto de temperatura entre el invernadero y el exterior,  $P_{calefacción}$ , viene dado por:

$$P_{calefacción} = U A DT \quad (13)$$

Por último, consideramos el balance global de energía del inventario de agua en el ciclo nocturno, para determinar el período de funcionamiento útil, empleando nuevamente la ecuación (6).

## RESULTADOS

### Análisis termo-hidráulico para un invernadero de 50m<sup>2</sup>

Resolveremos el conjunto de todas las ecuaciones anteriores para el siguiente conjunto de valores fijados a los parámetros geométricos, térmicos e hidráulicos del sistema, obteniendo el conjunto de resultados volcados en las Tablas I a VII.

Irradiación diaria	1,5	kWh/m <sup>2</sup>
Área invernadero	50	m <sup>2</sup>
Eficiencia colector	35%	
Energía diaria disponible	<b>26,3</b>	<b>kWh</b>

Tabla I. Parámetros y cálculo de ganancia solar.

Diámetro exterior (3/4")	22,05	Mm
Longitud total	300	M
Área intercambio	20,8	m <sup>2</sup>
Coef. convección $h_e$	10	W/m <sup>2</sup> °C
DT promedio	20	°C
<b>Potencia absorción</b>	<b>4,2</b>	<b>kW</b>
Tiempo de operación	6	Horas
<b>Energía absorbida</b>	<b>24,9</b>	<b>kWh</b>

Tabla II. Datos térmicos del intercambiador diurno.

Volumen tanque	750	Litros
DT ciclo diario en tanque	25	°C
<b>Energía almacenada</b>	<b>21,9</b>	<b>kWh</b>

Tabla III. Sistema almacenador de calor de agua.

Diámetro (3/4")	22,05	mm
Longitud total	200	m
Área intercambio	13,9	m <sup>2</sup>
Coef. convección $h_e$	20	W/m <sup>2</sup> °C
Salto Temperatura	25	°C
<b>Potencia entregada</b>	<b>6,9</b>	<b>kW</b>
Lapso de operación	3	horas
<b>Energía entregada</b>	<b>20,8</b>	<b>kWh</b>

Tabla IV. Datos térmicos del intercambiador noche.

Numero líneas	2	#
Caudal total	250	litros/h
Caudal línea	3,472 E-05	m <sup>3</sup> /s
A pasaje hidráulica	0,0002849	m <sup>2</sup>
Velocidad flujo	0,1218843	m/s
Viscosidad agua	9,00E-04	Ns/m
Densidad agua	1.000	Kg/m <sup>3</sup>
Número Reynolds	2986	laminar
Coef. fricción $f$	0,0214	#
DP presión	2.170	bar
<b>Potencia bombeo</b>	<b>0,15</b>	<b>W</b>
<b>Consumo bombeo</b>	<b>0,90</b>	<b>Wh</b>

Tabla V. Datos hidráulicos del intercambiador diurno.

Número de líneas	2	
Caudal total	250	litros/h
Número Reynolds	2.229	laminar
<b>Potencia bombeo</b>	<b>0,07</b>	<b>W</b>
<b>Consumo bombeo</b>	<b>0,22</b>	<b>Wh</b>

Tabla VI. Datos hidráulicos del intercambiador noche.

Salto Temp. indoor/outdoor	20	°C
Área invernadero	50	m <sup>2</sup>
$U$ global transm. Calor	6,9	W/m <sup>2</sup> °C
<b>Potencia calef. Requerida</b>	<b>6,9</b>	<b>kW</b>

Tabla VII. Confort térmico en ciclo nocturno

El análisis de estos resultados térmicos e hidráulicos permite establecer que:

- El rendimiento como colector solar (de ganancia solar) del invernadero no es un parámetro crítico del sistema. Aun estimando el mismo con una eficiencia muy baja (35%), logra captar suficiente energía, o de otro modo, asumiendo eficiencias más reales (50%) podría satisfacer la demanda nocturna también en días de baja irradiación solar.
- El rendimiento térmico de ambos intercambiadores de calor es bueno, empleando líneas de gran longitud que proveen el área de intercambio necesaria. Este diseño se considera altamente factible, considerando el bajo costo y sencillez que permiten las líneas continuas de mangueras flexibles de riego de baja (3/4") sección, que ocasionan una carga mecánica moderada y muy distribuida sobre la estructura soporte del invernadero.
- El rendimiento hidráulico de ambos intercambiadores es muy bueno; los flujos laminares establecidos permiten mantener las pérdidas de presión en niveles muy bajos, a pesar de la gran extensión de las líneas. En este sentido, el uso de múltiples líneas en paralelo brinda un grado de libertad útil para optimizarlo. La energía consumida en el bombeo es casi despreciable, pudiendo abastecerse con muy pequeña batería común de 12V.
- El rendimiento energético del sistema almacenador de calor (utilizando el invernadero como colector solar) es muy bueno; con un inventario relativamente moderado de agua se logra almacenar una cantidad de energía (21,9 kWh) suficiente para evitar heladas nocturnas durante 3 horas. Esta figura justifica de por sí el uso del sistema propuesto, como una alternativa sustentable para brindar confort térmico a los invernaderos.
- La potencia requerida por el invernadero durante la noche se corresponde con la aportada por el sistema irradiador de calor nocturno, por lo que concluimos que el intercambiador de calor nocturno también está bien dimensionado.

Comparando el autoconsumo en la bomba y la energía térmica almacenada, surge el punto de mayor fortaleza del sistema, muy sustentable. Esto permitiría su empleo en locaciones remotas sin tendido eléctrico (utilizando una pequeña batería y un panel fotovoltaico), lo cual de por sí permitiría un horizonte de aplicación muy vasto, e incluso asociado a pobladores rurales de bajos recursos, que no cuenten con tendido eléctrico.

#### Análisis termo-hidráulico para un invernadero de 500m<sup>2</sup>

Dado el excelente rendimiento térmico del caso anteriormente estudiado, se analiza ahora el desempeño del sistema aplicado a un gran invernadero, de superficie cubierta 500m<sup>2</sup>, es decir diez veces mayor que en el caso anterior. Los parámetros de diseño y resultados son ilustrados sintéticamente en las Tablas VIII a XIV.

Irradiación diaria	1,5	kWh/m <sup>2</sup>
Área invernadero	500	m <sup>2</sup>
Eficiencia colector	50%	
Energía diaria disponible	<b>375</b>	<b>kWh</b>

Tabla VIII. Parámetros y cálculo de ganancia solar.

Longitud total	3000	M
<b>Potencia absorción</b>	<b>42</b>	<b>kW</b>
Tiempo de operación	7	Horas
<b>Energía absorbida</b>	<b>290</b>	<b>kWh</b>

Tabla IX. Datos térmicos del intercambiador diurno.

Volumen tanque	1200	Litros
DT ciclo diario en tanque	25	°C
<b>Energía almacenada</b>	<b>350</b>	<b>kWh</b>

Tabla X. Sistema almacenador de calor de agua.

Numero líneas	20	
Velocidad flujo	0,17	m/s
<b>Potencia bombeo</b>	<b>28</b>	<b>W</b>
<b>Consumo bombeo</b>	<b>199</b>	<b>Wh</b>

Tabla XI. Datos hidráulicos del intercambiador diurno.

#### Análisis de Costos

En la Tabla XV se ilustra la apertura de costos del sistema bajo los parámetros de diseño utilizados en este ejercicio de aplicación estudiado para el primer caso (50m<sup>2</sup>). Cabe mencionar que el costo específico se podría reducir apreciablemente si se aplicase este sistema en invernaderos de mayor extensión. El costo de los sistemas de bombeo y de control es casi fijo, y el costo específico del tanque se reduce conforme aumenta el volumen almacenado (siguiendo la conocida relación de escaleo, de exponente 2/3). No se consideraron costos de mano de obra, dado que la extrema sencillez del sistema propuesto lo vuelve asequible de construir por el propio usuario.

Costos unitarios	
Manguera negra ¾" K2	0,5\$/m
Tanque bicapa 750L	\$350
Bomba 12V pecera	\$150
Tees plásticas ¾"	\$5
Válvulas esféricas ¾"	\$8
Torre para tanque	\$100
Costos totales por ítem	
Manguera negra ¾" K2	\$250
Tanque bicapa 750L	\$350
Bomba 12V pecera	\$50
Tees plásticas ¾"	\$30
Válvulas esféricas ¾"	\$16
Torre para tanque	\$100
<b>Costo Total (para 50m<sup>2</sup>)</b>	<b>\$800</b>
<b>Costo específico</b>	<b>16 \$/m<sup>2</sup></b>
<b>Costo Total (para 500m<sup>2</sup>)</b>	<b>\$5,000</b>
<b>Costo específico</b>	<b>10 \$/m<sup>2</sup></b>

Tabla XV. Apertura de costos.

Para tener una idea relativa de estos costos, debemos compararlos con los de un invernadero convencional. Estos últimos se ubican en nuestro país en el rango de 60 a 100\$/m<sup>2</sup>, correspondiendo un tercio o más a la cubierta (duración 3 años). Consideramos entonces que el sobreprecio introducido por este sistema es moderado, y que se podría justificar en función de las ventajas que ofrece. Cabe resaltar que más allá del sobreprecio, en las locaciones de climas fríos este sistema viabiliza por completo el uso del invernadero, el cual de otra forma estaría muy restringido durante la mayor parte del año, siendo perentorio el uso de algún tipo de calefactores, so pena de inviabilizar el invernadero en sí mismo, por lo que el uso de este u otro sistema de calentamiento más que un sobreprecio, debería analizarse como un costo inherente al mismo invernadero. En este sentido, el sistema propuesto tiene un costo muy competitivo, si se lo compara con un conjunto de calefactores eléctricos que entreguen igual potencia (6,9 kW), sobre todo cuando se incluyen los costos del tendido de cables de gran sección hasta el invernadero. En aquellos lugares remotos donde el tendido eléctrico no existe siquiera, este sistema se convertiría en la única opción práctica disponible, siendo posible, por ejemplo, cargar durante el día la batería y/o pila con la cual se alimenta la bomba, con un muy modesto panel fotovoltaico de menos de 1W pico.

Longitud total	2000	m
<b>Potencia absorción</b>	<b>69</b>	<b>kW</b>
Tiempo de operación	5	horas
<b>Energía absorbida</b>	<b>346</b>	<b>kWh</b>

Tabla XII. Datos térmicos del intercambiador noche.

Numero líneas	10	
Velocidad flujo	0,17	m/s
<b>Potencia bombeo</b>	<b>14</b>	<b>W</b>
<b>Consumo bombeo</b>	<b>69</b>	<b>Wh</b>

Tabla XIII. Datos hidráulicos intercambiador noche.

Salto Temp. indoor/outdoor	20	°C
Área invernadero	500	m <sup>2</sup>
<i>U</i> global transm. Calor	6,9	W/m <sup>2</sup> °C
<b>Potencia Calef. requerida</b>	<b>69</b>	<b>kW</b>

Tabla XIV. Confort térmico en la noche.

## *Análisis Complementarios*

El análisis termo-hidráulico permite abrir expectativas muy positivas respecto al rendimiento del sistema. Su gran sustentabilidad, apoyado en el bajo autoconsumo energético (se puede alimentar con una pequeña batería de 12V), son otra de sus fortalezas, siendo que podrían emplearse en locaciones remotas sin red eléctrica. Cabe mencionar que el costo del tendido eléctrico (el cual debería dimensionarse para la gran potencia eléctrica requerida en el intervalo crítico durante el cual se produce la helada) es lo que imposibilita en muchos casos el uso de calentadores convencionales eléctricos para controlar las heladas. Si por ejemplo se utilizaran calentadores eléctricos de potencia equivalente a la potencia térmica provista por el sistema nocturno aquí diseñado (6,9 kW) con cables de 220V A/C, se necesitaría alimentarlos con una corriente de 70 amperios, siendo por lo tanto conductores eléctricos de gran sección. Cabe aclarar que en el análisis térmico global se ha considerado pérdidas en el tanque almacenador moderadas (menores al 10%), correspondientes a un tanque convenientemente aislado térmicamente. Sin embargo, de nuestra experiencia directa es posible asegurar este nivel de aislación empleando aislantes modernos de muy bajo costo (polietileno relleno con globitos de aire, conocido como pluribol).

Otra pregunta pertinente es: ¿qué pasaría con el rendimiento del sistema durante los días nublados? La posibilidad de plantear aquí fácilmente un sistema híbrido se vuelve aquí otra ventaja estratégica del sistema propuesto. En efecto, sería posible plantear el uso de un calefactor eléctrico de pequeña potencia (se podría utilizar durante las 24 horas del día para precalentar el tanque reservorio, a diferencia de los calefactores de aire que se emplearían únicamente durante el pico de heladas) para complementar el calentamiento solar durante los días de baja irradiación solar.

La posibilidad de automatizar totalmente o parcialmente el proceso de trabajo (encender la bomba para recircular el agua del reservorio por uno u otro intercambiador de calor durante los intervalos temporales adecuados) con sistemas comerciales de bajo costo, es otra fortaleza del sistema. En efecto, se venden en el mercado sistemas tipo data-logger que registran la temperatura ambiente y pueden disparar una acción de control útil (mediante un interruptor a relee), como ser el encendido de la bomba fijando un nivel de alarma, por ejemplo: el encendido de la bomba durante la noche cuando la temperatura del invernadero desciende por debajo de 5°C, y también podría disparar el encendido de la bomba durante la mañana cuando la temperatura del invernadero asciende por encima de cierto nivel útil, por ejemplo, 20°C. Otros sistemas más sencillos (como el uso de un simple switch temporizador tipo reloj habituales en sistemas de calefacción con bomba de agua hogareños, (que permite digitar el encendido o apagado de la bomba con escalones de media hora) también serían factibles, con un modesto ajuste diario por parte del usuario, siguiendo el calendario solar. El universo de opciones a estudiar en el futuro es muy amplio, de la mano del desarrollo en microprocesadores económicos hoy disponibles en el mercado.

El análisis para un gran invernadero (500 m<sup>2</sup>) demostró la gran flexibilidad del sistema propuesto. Se puede mantener el flujo laminar (y con ello, el bajísimo consumo) aumentando el número de líneas paralelas de mangueras plásticas dispuestas como intercambiadores de calor. Simplemente aumentando el volumen del tanque reservorio (el cual se puede expandir en cualquier momento, colocando un segundo tanque interconectado al primero, etc.) y la extensión de las mangueras, se puede extender y ampliar el sistema, hasta abarcar potencias de calefacción notables como en el caso estudiado (70 kW), que implicarían el tendido de importantes líneas eléctricas si quisieran suplirse por calefactores eléctricos convencionales.

Cabe mencionar que, siendo que el sistema permite reducir notablemente el sobrecalentamiento diurno, sería factible aprovechar esta ventaja diseñando estructuras soportes de menor altura, lo cual redundaría en un ahorro de costos que fácilmente podría incluso absorber el coste total del sistema propuesto. Siguiendo esta línea de diseño, proponemos construir invernaderos parabólicos de baja altura o flecha, posiblemente con pasillos internos soterrados para facilitar las labores (ver Figura 1). De este modo, el invernadero típico de una planta de 3,5 a 4 metros de ancho (para el paño standard del etileno de 7m de ancho) se puede extender a 5 o 5,5 metros, lo cual redundaría en una reducción del 30% en sus costos específicos (\$/m<sup>2</sup>) lo cual a su vez absorbe y equilibra el sobreprecio (del orden del 20%) del sistema propuesto aquí.

En cuanto al ciclo de vida del sistema propuesto, puede mencionarse que será seguramente mayor al de la envuelta del invernadero (3 años), siendo que ambos intercambiadores quedarían protegidos del medio exterior (y en parte de la radiación UV) por la cubierta del invernadero. El tanque reservorio de agua tiene una vida útil muy superior, sobre todo al estar recubierto por el aislante (pluribol) plástico. Cabe mencionar que el extremadamente bajo costo del pluribol (0,6\$/m<sup>2</sup>) y sus relativas buenas propiedades mecánicas y su resistencia excelente a la lluvia y humedad (a diferencia de la lana de vidrio), previsto en bobinas de 100m de longitud y 1m de ancho, vuelve muy sencillo el lograr un muy eficaz sistema de aislación (recubriendo el tanque tipo bufanda con varias capas de pluribol transparente y empleando una última capa del que viene con una cara aluminizada, para prolongar la vida útil del aislante, ya que no viene con filtro UV).

## **CONCLUSIONES**

Se presenta, a nivel de ingeniería conceptual, un original sistema de control térmico para invernaderos que permitiría extender el uso de los mismos a climas fríos y/o de gran amplitud térmica. Su diseño se muestra como su gran fortaleza, su uso se puede plantear universalmente tanto para invernaderos existentes como nuevos, empleando materiales de disponibilidad casi universal y técnicas de construcción asequibles al usuario medio. Siendo un sistema muy flexible y modular, permite futuras ampliaciones y modificaciones con gran libertad: ampliar el largo, sección y número de líneas hidráulicas de intercambio de calor, el volumen del tanque reservorio, la potencia de bombeo, etc.

Siendo un diseño innovativo que se presenta aquí por primera vez, ciertamente su validación requerirá de futuras investigaciones, sobre todo experimentales. El invitar a todos los colegas a sumarse a ésta, es el principal objetivo de ésta.

Animado de este espíritu y entendiendo que se trata de una tecnología de carácter eminentemente social, es que los autores han decidido no patentar (y en cambio liberar esta tecnología para su uso universal) esta invención.

## AGRADECIMIENTOS

A la empresa Du Pont y al Conicet, quienes a través del Premio Energías Limpias 2009 otorgado oportunamente, han facilitado y apoyado esta línea de investigación, en diseño de soluciones innovativas de arquitectura solar.

## REFERENCIAS

- H. Suárez y L. Saravia. Balance energético y de masa en un invernadero con acondicionamiento térmico solar. Actas del VII Congr. Latinoam. Transf. Calor y Materia LATCYM 98, v4, 1082-1087, 1998.
- S. Bistoni, A. Iriarte y L. Saravia. Colector de aire con acumulador de agua para calefacción de invernaderos. AVERMA Vol.8, N° 1, 2004.
- L. Saravia, R. Echazú, M. Quiroga, C. Cadena, P. Robredo, S. Flores. Cultivo hidropónico en invernadero: Uso de acumulador de piedras y malla aluminizada para control térmico. AVERMA 1, 1997.
- Condorí M. y Saravia L. El uso de invernaderos como colector solar. AVERMA 2, 1998.
- Condorí, M., Echazú R. y Saravia, L. Simulación del comportamiento térmico de un invernadero acondicionado con absorbedor solar y acumulador de lechos de piedras. AVERMA 3, 1999.
- Juanicó. A new design of configurable solar awning for managing cooling and heating loads. Energy and Building 41(12), pp.1381-1385, 2009.
- Fernandez Gonzalez A. Economic Analysis of the Cost Effectiveness of Passive Solar Heating Strategies in the Midwest of US. 2005. World Solar Congress, Orlando, USA.
- Juanicó. Innovative Solar Roof for domestic heating and cooling. Solar Energy 82 (6), pp. 481-492, 2008.
- Juanicó. New Design of Solar Roof for Household Heating and Cooling. Int. J. of Hydrogen Energy 11, 5823-5826, 2010.
- Baer S. y Mingenbach W. Passive heating and cooling system. US patent 6,357,512. En: <http://www.zomeworks.com/tech/doubleplay/index.html>. 2002.
- Hay H. and Yellott. International aspects of air conditioning with moveable insulation. Solar Energy 12(4), 427-430. 1969.
- Hay H. A passive heating and cooling system from concept to commercialization. Ann. M. of American Society ISES. 1977.
- R. Righini, H. Grossi Gallegos y C. Raichijk, Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. Renewable Energy, vol. 30, pp.1241-1255, 2005.
- Incropera, F. y DeWitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley&Sons, 2007.

## ABSTRACT

An innovative water system designed for providing thermal comfort to greenhouses is presented. This universal system is especially suitable for applying in cold weather locations, where night temperatures low causes frozen conditions, causing vegetal production died. The thermal and hydraulic designs are presented together with the solar gain and cost analysis, showing that the system is sustainable and low cost one, besides of being technically feasible. The very low energy consumption of the water pump becomes this system suitable for remote locations without electricity grids.

**Keywords:** solar energy, solar architecture, solar thermal collector, greenhouse.