

# INVERNADERO CALEFACCIONADO CON SISTEMA COMBINADO SOLAR - BIOMASA: ANALISIS TERMICO Y ENSAYOS PRELIMINARES \*

A. Iriarte <sup>#</sup>, S. Bistoni y V. García  
INENCO - Catamarca  
Fac. de Ciencias Agrarias - UNCa.  
M. Quiroga N° 93 - 4700 - Catamarca  
E.mail: inenco@unctcc.edu.ar

L. Saravia <sup>#</sup> y R. Echazú  
INENCO - UNSa. - Salta

D. Carabajal y L. Tomalino  
E.E.A. - INTA - Catamarca

## RESUMEN

La necesidad de garantizar los niveles óptimos de temperatura en los cultivos bajo cubierta, cuando se usan fuentes de energía renovables discontinuas, como puede ser la energía solar, eólica, etc., se hace imprescindible el uso de una fuente complementaria.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio térmico para la calefacción de un invernadero macrotúnel doble y los ensayos preliminares de un sistema de calentamiento combinado entre energía solar y biomasa procedente de desechos agrícolas o leña. Se analizan los procesos de intercambio energético, la demanda de energía, el diseño propuesto, y los ensayos realizados con el quemador - calentador de agua con biomasa como combustible.

## INTRODUCCION

En los últimos años se han intensificado los estudios tendientes a la utilización de los invernaderos en una doble función, durante el período estival como secador de productos y durante el invierno como productor, especialmente para ser utilizados por pequeños productores del oeste catamarqueño. En ese sentido, se ha desarrollado un invernadero - secador tipo macrotúnel doble, cuyos resultados han demostrado la factibilidad de su uso. Sin embargo, la producción bajo cubierta durante la época invernal aún no está garantizada, en razón de que dicha producción está condicionada al aporte de energía térmica durante el período de heladas. Su atención mediante combustibles tradicionales incide en forma significativa en los costos finales de los productos, especialmente en zonas alejadas. El uso de energías renovables tales como la solar, eólica, biomasa, etc., puede ser atractivo en virtud de que son generadas en forma local y producen baja contaminación energética.

Por otro lado, el uso de una fuente renovable única, como la solar, tiene problemas de disponibilidad en virtud de los cambios meteorológicos, requiriendo para su uso una acumulación de calor, que eleva los costos. Se plantea como alternativa más económica y de mayor confiabilidad el uso de dos fuentes complementarias, como son la solar y la biomasa generada en el medio rural, de manera que esta última sea usada en períodos de disminución o escasez de la primera.

En el presente trabajo se describe un sistema integrado con abastecimiento dual de energía, detallándose los mecanismos de intercambio de calor y cuantificando la demanda total de energía nocturna. Asimismo se discuten los resultados de los ensayos preliminares obtenidos en un prototipo experimental, en términos de la calefacción auxiliar suministrada por el sistema.

## INTERCAMBIO Y DEMANDA DE ENERGIA

El invernadero a calefaccionar esta constituido por dos estructuras tipo macrotúnel de 7 m de ancho, 20 m de largo, 3,5 m de altura máxima y 2 m de altura en los laterales, ubicado uno al lado del otro, con sus ejes paralelos, orientados de Este a Oeste y unidos entre sí por una canaleta que permite la evacuación del agua de lluvia. La estructura de los invernaderos está formada por elementos semicirculares [1] que constituyen arcos montados sobre columnas, unidos por su parte media y superior conformando un túnel.

En la valorización de la demanda de energía necesaria para calefaccionar un invernadero doble macrotúnel con cubierta de plástico de 300 m<sup>2</sup>, a temperaturas óptimas, 18 - 21 °C se han tenido en cuenta una serie de factores que están relacionados entre sí.

\* Parcialmente financiado por:  
INENCO, BID - CONICET N° 307  
E.E.A. INTA - Catamarca  
SEDECyT - UNCa.

<sup>#</sup> Miembro de carrera del CONICET

Para evaluar estos factores y determinar la demanda energética, en esta primera etapa, se han realizado estimaciones aproximadas en base a:

**Características climáticas:** El invernadero está construido a 10 km de la capital, en el Campo Experimental del INTA, Dpto. Valle Viejo. Su eje está orientado en la dirección Este - Oeste y está emplazado en un lugar que no tiene protección de vientos. Los datos de temperatura máximas - mínimas, velocidad de viento y humedad relativa fueron obtenidos del Servicio Meteorológico del INTA ubicado a 1000 m del invernadero. Se consideró que el valor de la temperatura mínima ambiente de referencia para el cálculo sea igual al promedio mensual de temperaturas mínimas del mes más frío del año, promedio durante los últimos 20 años. En la Fig.1, se muestra las mínimas absolutas y los promedios mensuales de la mínima del mes más frío de cada año, durante 20 años (1976 - 1996). De esta forma se obtuvo que el valor de la mínima de referencia es  $T_{pmm} = 5,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . La mínima absoluta, usando igual criterio, es  $T_{pmma} = -1,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , la velocidad de viento es  $v = 1 \text{ m/s}$ , la humedad relativa ambiente es  $HR_{ac} = 60,5 \%$ . La humedad relativa nocturna del ambiente interior se supone  $HR_{ai} = 85\%$ .

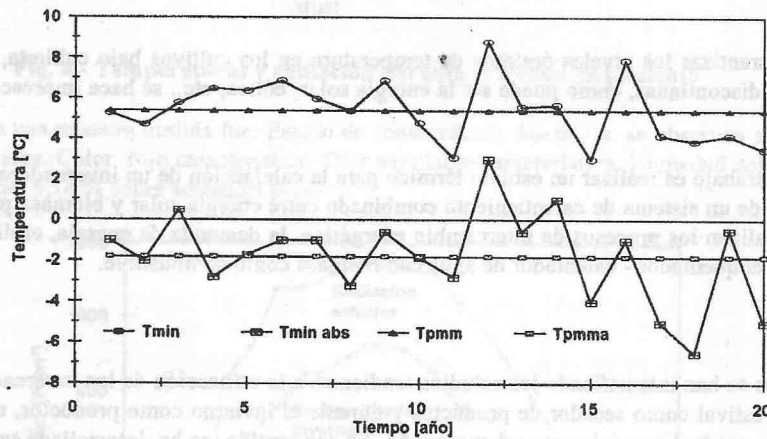


Fig.1. Mínimas absolutas y promedios mensuales del mes más frío de los últimos 20 años

**Actividades productivas:** El cultivo seleccionado para el ensayo es el melón, cuya temperatura mínima letal está entre  $0 - 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , la temperatura mínima biológica  $12 - 14 \text{ }^\circ\text{C}$ , la temperatura óptima durante la noche  $18 - 21 \text{ }^\circ\text{C}$ , durante el día  $24 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura máxima biológica  $30 - 34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Mecanismos de transferencia de calor y masa:** Se han considerado los intercambios radiativos, convectivos, conductivos, condensación de agua, infiltraciones y renovaciones de aire, todos durante el período nocturno. Se pueden resumir, en una primera aproximación, en los siguientes mecanismos de pérdida: a) Intercambio por radiación provenientes del suelo; b) Intercambio por convección con el aire exterior, ambiente interior, suelo y paredes; c) Intercambio por conducción en el suelo interior; d) Intercambio de calor por condensación sobre cubierta.

**Intercambios energéticos por radiación térmica:** La valorización de los intercambios radiativos en el invernadero es función de la temperatura de suelo, transmitancia del material de cobertura y emitancia del suelo o masa vegetal. Puede ser calculado por:  $q_r = \sigma \epsilon_s \tau_c S_s (T_s^4 - T_{sk}^4) \text{ [W]}$ ; donde  $T_{sk} = 0,0552 (t_{ac} + 273)^{3/2} \text{ [K]}$

**Intercambios energéticos por conducción - convección:** En el proceso de intercambio por conducción - convección se destacan los intercambios del aire interior con la cubierta mediante un coeficiente convectivo  $h_i$ , el proceso de conducción por el material de cobertura y el intercambio entre la cubierta y el aire exterior mediante un coeficiente convectivo  $h_e$ , de esta forma:  $q_{c-c} = K_{c-c} \cdot S_d (t_{ai} - t_{ae}) \text{ [W]}$   $S_d = S_f + S_c + S_l \text{ [m}^2\text{]}$   $K_{c-c} = 1/(1/h_i + x/k + 1/h_e) \text{ [W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C]}$  donde  $h_i = 7,7 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $h_e = 5,7 + 3,8 v$  para  $v < 5 \text{ m/s}$  y  $h_e = 7,78 v^{0.8}$  para  $v > 5 \text{ m/s}$ . Como el plástico es de 150 micrones se puede suponer que  $e/k \rightarrow 0$  y por lo tanto:  $K_{c-c} = (h_i \cdot h_e)/(h_i + h_e) \text{ [W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C]}$  y la pérdida de calor a través del terreno depende del tipo de suelo y de su contenido de humedad, pero en una primera aproximación se puede calcular con:  $q_s = k_s S_s (t_s - t_{sx})/x \text{ [W]}$ , para  $t_{sx} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $k_s = 0,26 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $x = 1,5 \text{ m}$ .

**Intercambios directos entre el interior y exterior:** Los invernaderos, particularmente los de plástico, no son recintos estancos y en consecuencia hay pérdidas por infiltraciones, además de las renovaciones necesarias para mantener una atmósfera adecuada para el crecimiento de las plantas. La tasa de renovación depende del estado del invernadero y de la velocidad de viento, así como de las aberturas disponibles para realizar una renovación controlada. Para determinar la tasa

de renovación de aire por infiltraciones se puede usar la siguiente expresión empírica [2]:  $R = 0,6 + 0,022 v + 0,008 v^2$ , donde  $v$  es la velocidad del viento en [m/s]. En general se puede calcular el intercambio de calor como:

$$q_{\text{renov}} = 0,27 R V \rho (H_{a_i} - H_{a_e}) \text{ [W]}; \quad R[\text{1/h}]; \quad V[\text{m}^3] \quad \text{y} \quad \rho[\text{Kg/m}^3] \quad \text{donde la entalpia del aire es:}$$

$$H_a = t_a + w_a (2501 + 1,805 t_a) \text{ [kJ/kg}_{\text{as}}] \quad \text{y} \quad w_a = [(0,62198 P_{\text{vs}} \text{ RH}/100) / (P_T - P_{\text{vs}} \text{ RH}/100)] \text{ [kg/kg}_{\text{as}}].$$

**Intercambio de calor por condensación sobre la cubierta:** La masa transferida por condensación, en general, se puede poner como  $M_{\text{cond}} = h_{\text{cond}} \rho (W_{a_i} - W_c)$ , donde el coeficiente de transferencia de masa es:  $h_{\text{cond}} = h_c / \rho c_p$ , la transferencia de calor por condensación es:  $q_{\text{cond}} = S_c h_c L (w_{a_i} - w_c) / c_p$  donde el calor latente de condensación es  $L = 2454 \text{ kJ/kg}$  y el coeficiente convectivo de transferencia  $h_c = 8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $w_c$  es igual a  $w_a$  particularizado para el aire saturado a la temperatura de la cubierta.

Si suponemos que la temperatura de suelo, vegetación y paredes son iguales a la temperatura del ambiente interior, la temperatura de cubierta a  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  y que el cielo está totalmente despejado, se obtiene que la máxima pérdida del invernadero es de  $72,6 \text{ kW}$ , correspondiendo un  $33,6 \%$  a pérdidas por radiación,  $40,4 \%$  a pérdidas por conducción - convección,  $12,2 \%$  a pérdidas por infiltraciones y  $13,8 \%$  por intercambio de calor por condensación sobre la cubierta. Por otro lado, si se tiene en cuenta que un colector - intercambiador de plástico [3] tiene un coeficiente global de transferencia térmica de  $12 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  cuando actúa como intercambiador dentro de un invernadero, el calor aportado por el intercambiador es de  $216 \text{ W/m}^2$  de colección, para una diferencia de temperatura de  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . En consecuencia, es necesario para satisfacer la demanda de  $72,6 \text{ kW}$ , instalar  $334 \text{ m}^2$  de intercambiadores. Por lo tanto, si se supone que la demanda es durante 7 horas, la cantidad de energía necesaria será de  $1830 \text{ MJ}$ , lo que determina un volumen de acumulación de  $16840 \text{ litros}$ , para una temperatura inicial del agua de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  y final de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Respecto a la colección solar del sistema, considerando una radiación total diaria sobre superficie horizontal de  $18 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$ , y una eficiencia global de los colectores del  $12 \%$ , corresponde un aporte de  $3,8 \text{ MJ}$  por  $\text{m}^2$  de colector, lo que equivale a un total de aporte de  $648 \text{ MJ}$  diario.

### CARACTERISTICAS GENERALES DEL DISEÑO

En base a los resultados obtenidos precedentemente el sistema de calefacción que se propone está constituido por, Fig.1:

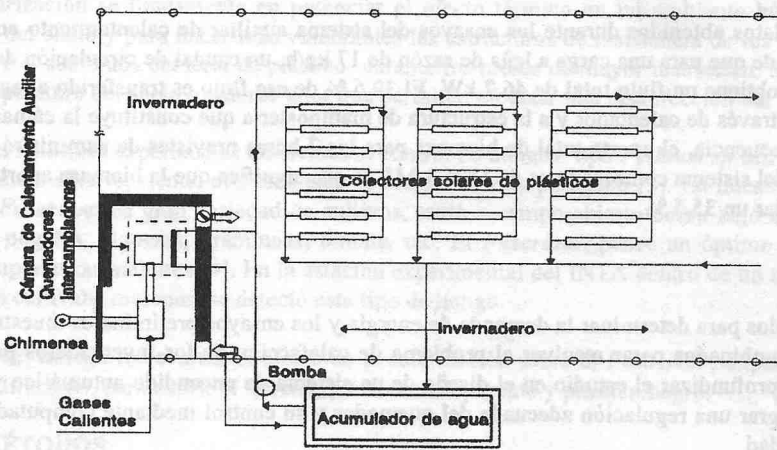


Fig. 1 Esquema del sistema general

- 1.- **Colectores solares sin cubierta:** Están contruidos por bolsas chatas de polietileno transparente, colgadas del techo del invernadero por encima de las plantas. En ellas el agua circula en zig zag por canales obtenidos por soldadura sobre el plástico;
- 2.- **Acumulador de agua caliente:** Está construido en la tierra, consiste en una excavación de  $1,5 \text{ m}$  de profundidad por  $3 \text{ m}$  de ancho y  $5 \text{ m}$  de largo, recubierto con plástico negro para su impermeabilización y cubierto en el exterior por un plástico transparente U.V. térmico. En los laterales, entre el plástico negro y la tierra, por debajo del nivel de agua, se ha colocado poliestireno expandido de  $5 \text{ cm}$  de espesor, como aislante térmico;
- 3.- **Calentador auxiliar con biomasa:** En el extremo este del invernadero se construyó una cámara para la concentración de la calefacción auxiliar. Está construida con paredes de mampostería, techo metálico con recubrimiento de lana de vidrio y barro. En su interior se ha instalado el horno quemador de biomasa Fig. 2, contruidos en chapa metálica y contruidos por: a) Cámara de combustión con serpentina de caño metálico en su exterior como intercambiador de calor con el agua que actúa como fluido de intercambio; b) Camisa metálica que recubre la cañería de intercambio y constituye una superficie de transferencia del calor; c) Chimenea forzada mediante un ventilador de  $100 \text{ W}$  para la evacuación de los gases. d) Alimentador de combustible sólido.

El diseño general del sistema construido, busca recoger durante el día el exceso de energía de origen solar en el invernadero mediante los colectores sin cubierta y lo acumula como agua caliente. Durante el día el agua se calienta por absor-



ción de radiación y por contacto con el aire del invernadero. Las bolsas están colgadas a lo largo del eje de los macrotúneles y con una de sus caras expuestas al Norte. Durante la noche la bomba de circulación se enciende cuando baja la temperatura en el invernadero y las bolsas actúan como un intercambiador de calor, calentado al ambiente. Cuando la temperatura del reservorio baja de un nivel preestablecido, una alarma indica la necesidad de poner en funcionamiento el sistema de calentamiento con biomasa. Como este sistema está ubicado dentro de una cámara de mampostería, el calor remanente que no es absorbido por el agua, es conducido al invernadero mediante un pequeño ventilador ubicado en una de las ventanas de la cámara.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

De acuerdo a los resultados de los cálculos de la demanda energética y a la configuración del sistema de calentamiento descrito precedentemente, se instalaron 336 intercambiadores de 0,5 m de ancho por 1 m de largo.

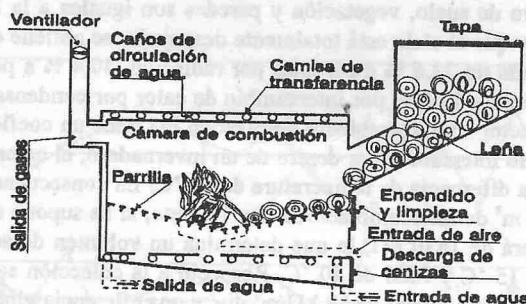


Fig. 2. Vista en corte del quemador - intercambiador

Para la medición de temperatura de aire se usó sensores tipo termistores conectados a un sistema de adquisición de datos tipo PC Lab. 812 con PC/AT. La temperatura en el quemador de biomasa, agua circulante y gases de combustión fue medida con termopares de cromel - alumen conectadas a un termómetro digital APPA53, rango 1 a 1100 °C ± 5 °C.

Del análisis de los datos obtenidos durante los ensayos del sistema auxiliar de calentamiento con biomasa (leña, P=19,8 10<sup>6</sup> J/kg), se desprende que para una carga a leña de razón de 17 kg/h, un caudal de circulación de agua de 600 l/h y de aire de 0,5 kg/seg, se obtiene un flujo total de 46,7 kW. El 39,6 % de ese flujo es transferido al agua (18,5 kW) y el 28,6% al aire que circula a través de calentador y a la estructura de mampostería que constituye la cámara de calefacción auxiliar (28,2 kW). En consecuencia, el aporte total de biomasa para las 7 horas previstas de suministro es de 1178,1 MJ, con lo cual el aporte total del sistema combinado es de 1826,1 MJ, lo que significa que la biomasa aporta un 64,5 % y el sistema de calentamiento solar un 35,5 %.

## CONCLUSIONES

Los cálculos realizados para determinar la demanda de energía y los ensayos preliminares muestran la factibilidad del uso de estos sistemas combinados para resolver el problema de calefacción de los invernaderos para la producción, a bajo costo. Es necesario profundizar el estudio en el diseño de un sistema de encendido automático y controlado del material combustible para lograr una regulación adecuada del quemador y su control mediante computadora, para mejorar su eficiencia y funcionalidad.

## NOMENCLATURA

$q_r$	Flujo de calor perdido por radiación [W]	$P_{vs}$	Presión de vapor saturado [ $P_s$ ]
$q_{c-c}$	Flujo de calor perdido por cond. y convección [W]	$\sigma$	Stefan-Boltzmann $5,52 \cdot 10^{-8}$ [ $W/m^2K^4$ ]
$q_s$	Flujo de calor perdido a través del suelo [W]	$\epsilon_s$	Emitancia del suelo: 0,75
$q_{remov}$	Flujo de calor perdido por infiltraciones [W]	$\tau_c$	Transmitancia de la cubierta: 0,70
$S_d$	Superficie de la cobertura [ $m^2$ ]	$T_s$	Temperatura de suelo [K]
$S_f$	Superficie frontal [ $m^2$ ]	$T_{sk}$	Temperatura de suelo [K]
$S_c$	Superficie de la cubierta [ $m^2$ ]	$t_{si}$	Temperatura aire interior [°C]
$S_l$	Superficie lateral [ $m^2$ ]	$t_{ac}$	Temperatura aire ambiente [°C]
$S_s$	Superficie del suelo [ $m^2$ ]	$t_s$	Temperatura suelo [°C]
$P_T$	Presión atmosférica [ $P_a$ ]	$t_{sx}$	Temperatura de suelo a una profundidad x [m]

## REFERENCIAS

- [1] A. Iriarte et al. "Invernadero tipo macrotúnel doble para secado de productos agrícolas". ASADES'95. San Luis.
- [2] J. Chiaple, C. Kittas et al. "Estimación regional de los requisitos de calefacción de los invernaderos". Acta horticultura 1981.
- [3] S. Bistoni et al. "Evaluación del comportamiento de materiales coloreados". ASADES'95. San Luis.