

## **INTEGRACION DE MODELOS PARA LA SIMULACION DE UNA CAMARA DE PRODUCCION DE PLANTAS CON APORTES SOLAR Y AUXILIARES #**

V. García, M. Gea<sup>1</sup>, M. Watkins<sup>2</sup>, y A. Iriarte<sup>3</sup>  
INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa  
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca, Argentina, vgarcia@plab.unca.edu.ar

**RESUMEN:** Un conjunto de colectores solares planos proveen agua caliente a las camas de enraizamiento de una cámara de microinjertación. Al resultar insuficiente la energía provista por los paneles, se complementa en algunos períodos del año con un sistema de calefacción tradicional a gas. Se adiciona un sistema de hidrocóoling para refrescamiento en verano y paneles fotovoltaicos para la provisión de energía eléctrica. Se está estudiando mediante simulaciones parciales y generales, el ajuste de diseño y optimización de todo el sistema, con el fin de lograr la máxima independencia energética. El presente trabajo muestra una simulación que integra simulaciones parciales ajustadas anteriormente. El estudio comparativo entre valores experimentales y simulados resultó satisfactorio. La simulación integrada permitirá en un futuro probar variantes en el diseño, evitando costosos ensayos experimentales.

**Palabras clave:** cámara de microinjertación, simulación energética integrada

### **INTRODUCCION**

La simulación de un sistema con Simusol (Saravia L. y Saravia D., 2000), se realiza en dos etapas. En la primera se dibuja el circuito eléctrico equivalente en un diagrama que se genera mediante el software DIA. En dicho diagrama se definen además los valores de los elementos del circuito en un cuadro de “datos”, las “condiciones iniciales”, la “rutina de integración” y los “parámetros” a estudiar. En la segunda etapa, el programa interpreta la hoja de datos del circuito y calcula la evolución de las variables térmicas en el tiempo (temperaturas y flujos de calor) pudiéndose utilizar como datos de entrada, archivos con los valores experimentales (temperatura ambiente, radiación solar, humedad, etc). Los resultados son presentados en tablas y curvas, de cuyo análisis se podrán inferir conclusiones.

En publicaciones anteriores se mostraron los desarrollos de modelos y simulaciones parciales de la cámara de microinjertación y de distintos sistemas térmicos que la conforman. En uno de ellos (Iriarte A. *et al.*, 2006) se realizó la simulación y validación experimental del modelo de la cámara conectada a un sistema de enfriamiento evaporativo mediante Simusol. Los resultados de la simulación permitieron estudiar la influencia de las características constructivas y estimar la performance térmica para diferentes requerimientos de cultivos.

Para lograr las condiciones óptimas en la cámara de injertos se calientan las mesadas de enraizamiento con agua caliente que proviene de un sistema mixto sol – gas a través de colectores solares que trabajan alternativamente con un termotanque a gas. La simulación de las mesadas se realizó utilizando el programa Simusol (García V. *et al.*, 2006).

Se elaboró y validó también una simulación que predice el comportamiento energético de un sistema fotovoltaico para condiciones normales de radiación solar y temperatura ambiente, a partir de las características estándar provistas por el fabricante. La misma está basada en un modelo formado por un circuito eléctrico y un circuito térmico acoplados. (Gea M. *et al.*, 2006).

En este artículo se presenta la integración de estos modelos en una simulación completa de la cámara con las aplicaciones solares y complementarias que conforman el sistema de provisión de energía, las camas de enraizamiento, el colector solar, el hidrocóoling, el panel fotovoltaico y el aporte controlado de energía de un termotanque auxiliar.

El objetivo general del trabajo fue la obtención de ajustes en los diferentes componentes del sistema integrado con el fin de emplear dichos resultados en la evolución del diseño de la cámara y su optimización.

### **MATERIALES Y MÉTODO**

#### ***Cámara de Microinjertación***

Se trabajó en una cámara de 46,67 m<sup>2</sup> de superficie cubierta con eje central orientado Norte - Sur. Las envolventes Este y Oeste se construyeron con mampostería de ladrillos de 0,15 m de espesor y 1 m de altura, con revoque interior y exterior,

---

# Parcialmente financiado por PFIP, UNCa, INTA

<sup>1</sup> INENCO - UNSa

<sup>2</sup> Fac. de Cs. Exactas y Naturales - UNCa

<sup>3</sup> Investigador del CONICET

sobre las cuales se asienta un vidriado en carpintería de aluminio. La pared Sur, sin vidriado, se construyó con la misma mampostería, asentada sobre cemento de hormigón, mientras que el cerramiento Norte se compone de un panel para el sistema de refrescamiento en la parte inferior y una superficie vidriada en la parte superior. Más detalles constructivos se encuentran en el trabajo de García *et al.* (2003). En su interior se encuentran las mesadas utilizadas como camas de enraizamiento.



Fig. 1. Vista interior y exterior de la cámara de microinjertación

**Proceso de Simulación**

Para realizar el balance de energía en la cámara se han tenido en cuenta las siguientes premisas:

1. El aire dentro de la cámara está mezclado, no hay gradientes verticales.
2. Las plantas en el interior del invernadero están a la misma temperatura del aire.
3. El invernadero se encuentra totalmente cerrado, no hay intercambio por ventilación, solo por infiltración (tres renovaciones por hora), cuando no funciona el hydrocooling.
4. No hay condensación en las cubiertas.
5. La transferencia de calor en el suelo es solo en la dirección vertical. Desde la superficie hasta los 0,50 m de profundidad se ha dividido en tres capas. La última capa se supone a 18 °C constantes.

Para poder explicar en detalle el circuito eléctrico equivalente, hemos dividido el gráfico en secciones. En la Figura 2, se muestra la sección de la simulación que corresponde a la cámara de injertos y sus paredes exteriores

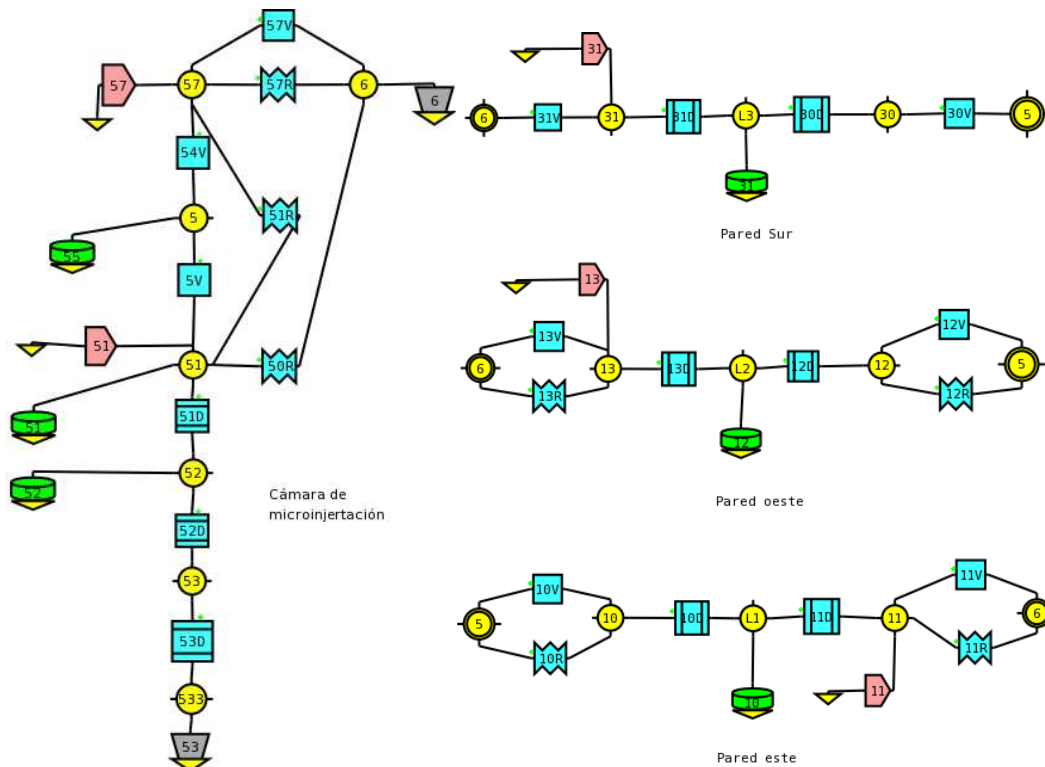


Fig. 2. Circuito térmico de piso, techo y paredes exteriores de la cámara.

Se han ubicado nodos para ambiente exterior (6), techo (57), suelo (51) y aire interior (5). Entre estos nodos se conectan las resistencias que representan las transferencias conductivas, radiativas y convectivas así como los flujos de calor (51) y (57) que representan a la radiación solar interior.

Al piso se lo considera formado por tres capas (Nodos 52, 53 y 533) hasta el nivel que tiene temperatura constante. La temperatura constante del suelo se representa con una fuente de temperatura (53). Asimismo, como se trata de capas de tierra que tienen masa y por lo tanto acumulación del calor, se adiciona en cada nodo un condensador con una capacidad equivalente (51 y 52).

Se representan mediante los nodos L1, L2 y L3 los circuitos térmicos de las paredes Este, Oeste y frontal Sur los que incluyen además resistencias conductivas, radiativas y acumuladores de calor representantes de la masa térmica del material de las paredes. En ellos se consideran las transferencias de calor a través de resistencias radiativas y convectivas al interior y al exterior y la absorción de una fracción de la radiación solar representada mediante los flujos de calor 11, 13 y 31.

De manera similar se construyen los circuitos térmicos de los vidrios laterales (Este y Oeste) y frontal (Norte) respectivamente. La Figura 3 muestra el esquema de dichos elementos. Los flujos de calor 8, 15 y 40 corresponden a la ganancia de calor debida a la radiación solar en los mismos. Se agregaron además las resistencias de pérdidas convectivas y radiativas de dichos elementos.

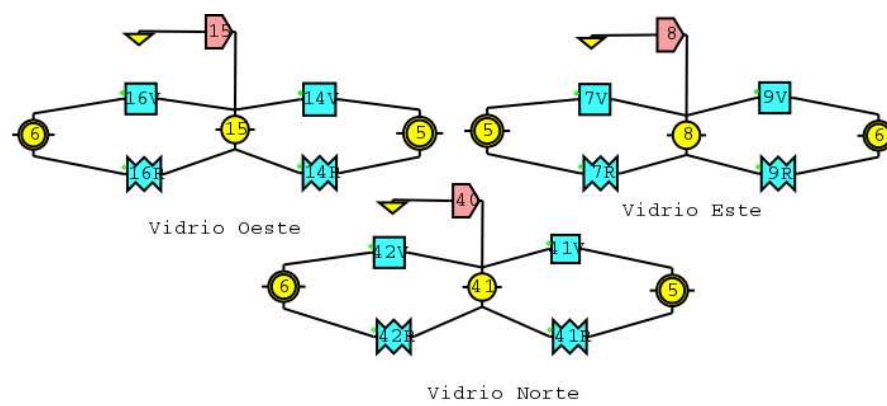


Fig. 3. Circuito térmico de los vidrios de la cámara.

#### Acondicionamiento higrotérmico. Hidrocooling

En la figura 4 está representado el modelo del sistema de enfriamiento evaporativo “hidrocooling” consistente en una fuente de calor y masa (70) que incorpora aire frío al interior de la cámara. La temperatura del aire, enfriado por evaporación de agua, es calculada por el programa a partir de la temperatura de bulbo húmedo exterior y de la eficiencia  $\epsilon$  del dispositivo mediante la ecuación (1).

$$T_1 = T_2 - \epsilon * (T_2 - T_{bh}) \quad (1)$$

La  $T_{bh}$  se obtiene para cada intervalo de tiempo usando una tabla de datos experimentales de la humedad y la temperatura exterior a partir de las ecuaciones (2), (3) y (4) (ASHRAE, 1989):

$$W = (2501 - 2.381 * T_{bh}) * W_{sat} - \frac{(T_2 - T_{bh})}{(2501 + 1.805 * T_2 - 4.186 * T_{bh})} \quad (2)$$

$$W_{sat} = \frac{0.622 * P_{sat}}{(P - P_{sat})} \quad (3)$$

$$P_{sat} = e^{(23.23 - 3841 / (T_{bh} + 238))} \quad (4)$$

Como las ecuaciones (2) y (4) son implícitas, para calcular la temperatura e bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ) se incorporó al modelo una rutina que resuelve el sistema mediante iteraciones. Esto fue posible porque SIMUSOL permite la definición por parte del usuario de funciones y subrutinas en módulos externos al modelo. Ello se realiza escribiendo la rutina en lenguaje Fortran y guardándola en la carpeta de trabajo en un archivo llamado *funciones.for*.

**Colector solar**

El colector solar que provee de agua caliente a las camas de enraizamiento está constituido por dos paneles de 2 m<sup>2</sup> cada uno conectados en serie. Están constituidos por una cubierta transparente simple de policarbonato alveolar y superficie absorbidora negra. El agua que circula por ellos es impulsada por una bomba de ½ HP.

El circuito para Simusol se puede observar en la figura 5. La placa absorbidora, la cubierta transparente y el agua se suponen isotérmicas en toda el área del colector por lo que se considera que la transferencia de calor es unidimensional. En el circuito térmico están representadas, la transferencia convectiva entre la placa y el agua (1T2) y las pérdidas de calor hacia el exterior a través de resistencias convectivas (4T2 y 6T2) y radiativas hacia arriba (3T2 y 5T2) y conductiva predominante hacia abajo (2T2). La masa térmica del agua que atraviesa el colector está representada por un acumulador (1T2)

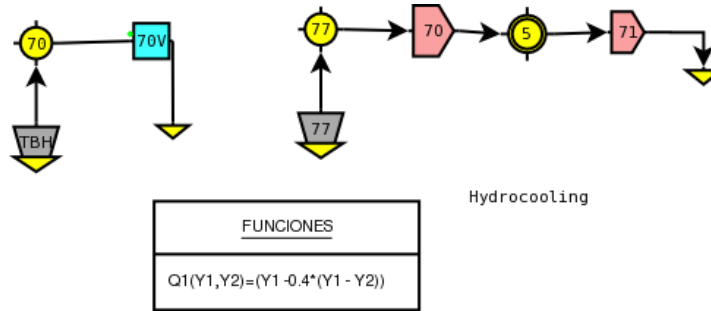


Fig. 4. Circuito térmico del sistema "hydrocooling"

Con los componentes descritos, se elaboró el Modelo (T2). Sus nodos de entrada/salida (a, b, c, d, e) sirven para conectar la radiación solar (c), la temperatura exterior (b), y la temperatura de cielo (d). La entrada y la salida del agua son conectadas a los nodos a y e respectivamente y el valor del caudal, provisto por la bomba, es tomado por el modelo como el parámetro PFLU. El flujo de calor y masa incluido en el modelo (1T2) entre los nodos a y e, representa la circulación del líquido por el interior del colector.

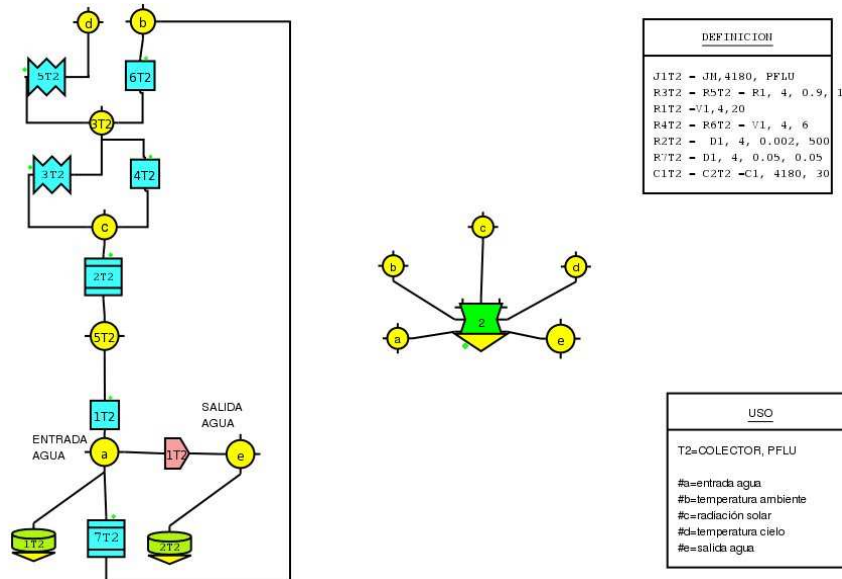


Fig. 5. Modelo del colector solar

**Camas de enraizamiento**

Al igual que en el caso del colector, para las camas de enraizamiento también se elaboró un Modelo. El diagrama desarrollado con el programa DIA, se muestra en la Figura 6. Sobre dicho modelo (T1) pudieron verificarse los valores de las resistencias de pérdidas conductivas, radiativas y convectivas de las camas de enraizamiento. El diagrama muestra un nodo de entrada de agua (a) un nodo de salida (b) y un nodo intermedio (3T1). Los nodos d, e y f representan las zonas de la cama, cubiertas con perlita, que reciben radiación solar, o introducen pérdidas radiativas hacia el ambiente. Finalmente el nodo c representa al aire ambiente y a través de este se producen las pérdidas convectivas.

La mesada se dividió en tres secciones iguales. Las pérdidas de calor ocurren a través de convección al aire ambiente y radiación hacia las superficies circundantes. En el circuito también se consideran las masas de acumulación y el flujo de agua

que atraviesa el sistema representado por los flujos de calor y masa (2T1 y 3T1). El flujo másico de agua es el parámetro PFLUAG del Modelo y debe coincidir en valor numérico con el parámetro PFLU del colector.

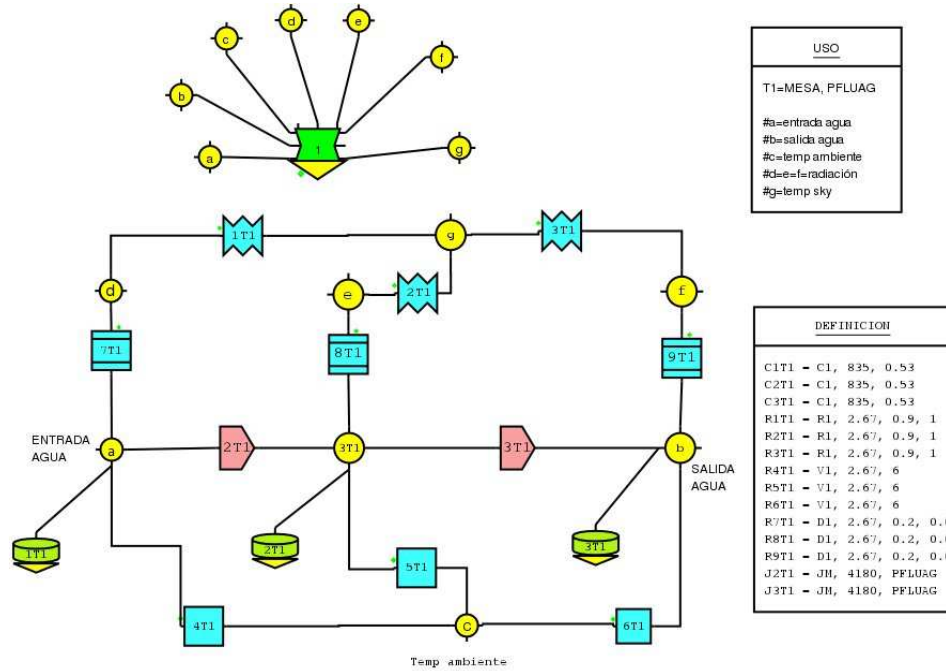


Fig. 6. Modelo de las capas de enraizamiento

### Paneles Fotovoltaicos

La simulación de los paneles fotovoltaicos se concretó mediante circuitos equivalentes que modelan los procesos eléctricos y térmicos. Simusol permite dibujar ambos en el mismo diagrama (Figura 7). El programa calcula la evolución térmica y eléctrica temporal actualizando en cada paso de cálculo el valor de los parámetros eléctricos en función de la temperatura de la celda con las relaciones definidas en el cuadro de funciones. Las ecuaciones involucradas en los cálculos se detallan a continuación:

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{ref}} \quad (5)$$

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right] \quad (6)$$

$$R_s = \frac{a \ln \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_L} \right) - V_{mp} + V_{oc}}{I_{mp}} \quad (7)$$

$$I_L = \frac{G_T}{G_{Tref}} \left[ I_{Lref} + \mu_{isc} (T_c - T_{cref}) \right] \quad (8)$$

$$\frac{I_0}{I_{0ref}} = \left( \frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 e^{\left[ \frac{E_g N_s}{a_{ref}} \left( 1 - \frac{T_{cref}}{T_c} \right) \right]} \quad (9)$$

$$\mu_{isc} = \frac{dI_{sc}}{dT} \cong \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (10)$$

$$\mu_{Voc} = \frac{dV_{oc}}{dT} \cong \frac{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (11)$$

Los elementos resistivos y las fuentes de corrientes del modelo eléctrico están predefinidos en Simusol. La característica tensión-corriente del diodo es representada por la función exponencial dada en la ecuación (6). Las características de fábrica

del panel fotovoltaico se ingresa como parámetro. El parámetro  $a$  definido en la ecuación (5) y las demás funciones que dependen de la temperatura de la celda están referidas al nodo 3 del circuito térmico. Las ecuaciones (7), (8) y (9) correspondientes a la resistencia en serie, a la corriente fotogenerada y a la corriente de saturación inversa respectivamente y para la simulación se incluyen en el cuadro “funciones”. La radiación solar y la temperatura del aire ambiente son ingresadas al programa mediante tablas incluidas en archivos de datos.

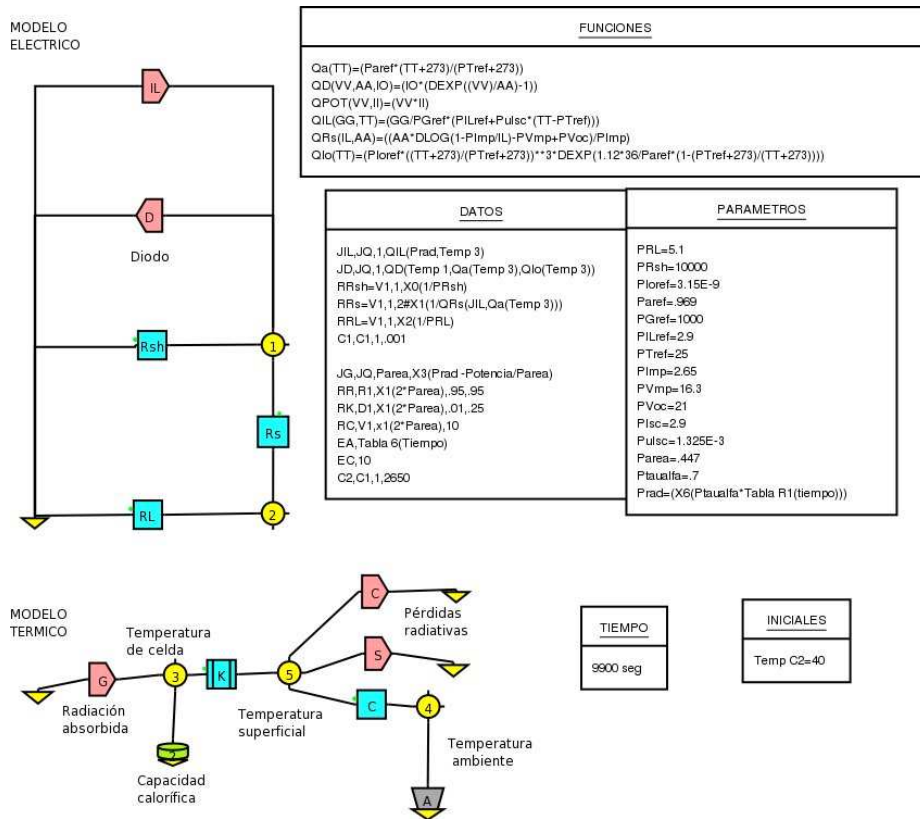


Fig.7. Diagrama del colector fotovoltaico

### SIMULACIÓN INTEGRADA

La primera verificación que se realizó fue el ajuste de las temperaturas ambiente interior experimental ( $T_{a,inE}$ ) y ambiente simulada ( $T_{a,inS}$ ). Las variables de ajuste fueron las transferencias convectivas, conductivas y radiativas de la cámara. La curva representativa de dichas variables puede verse en la Figura 8. El error medio de dicho ajuste resultó de 0,85 C (4,6 %) para un ensayo de 120 horas, en el que se realizaron 1440 mediciones (una cada 5 minutos).

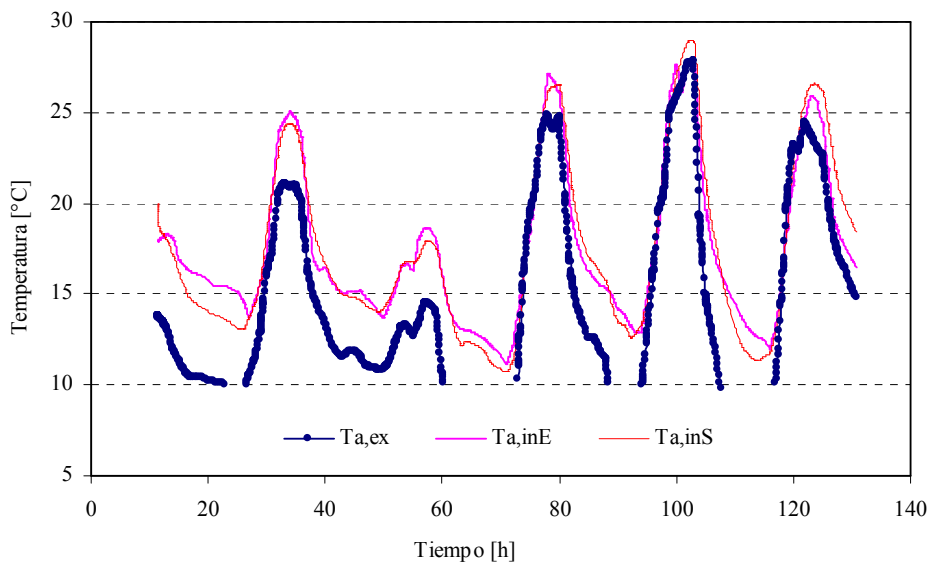


Fig.8. Curvas de ajuste del sistema integrado

Una vez ajustado el modelo y contrastados los valores con los datos experimentales se procedió al estudio de los consumos de gas y de energía fotovoltaica de todo el dispositivo. Las curvas que se visualizan en la Figura 9 corresponden a la simulación del consumo de gas, potencia instantánea ( $P_{gas}$ ) y energía total consumida ( $E_{gas}$ ). Puede observarse que, en los momentos de radiación solar media abundante, el sistema tiene una demanda de potencia nula del sistema alternativo de gas. Sin embargo, durante la noche y en días nublados, el consumo de gas es importante. Se infiere, por estos resultados que será necesario aumentar la superficie colectora de calor de los paneles y el tamaño del reservorio de agua.

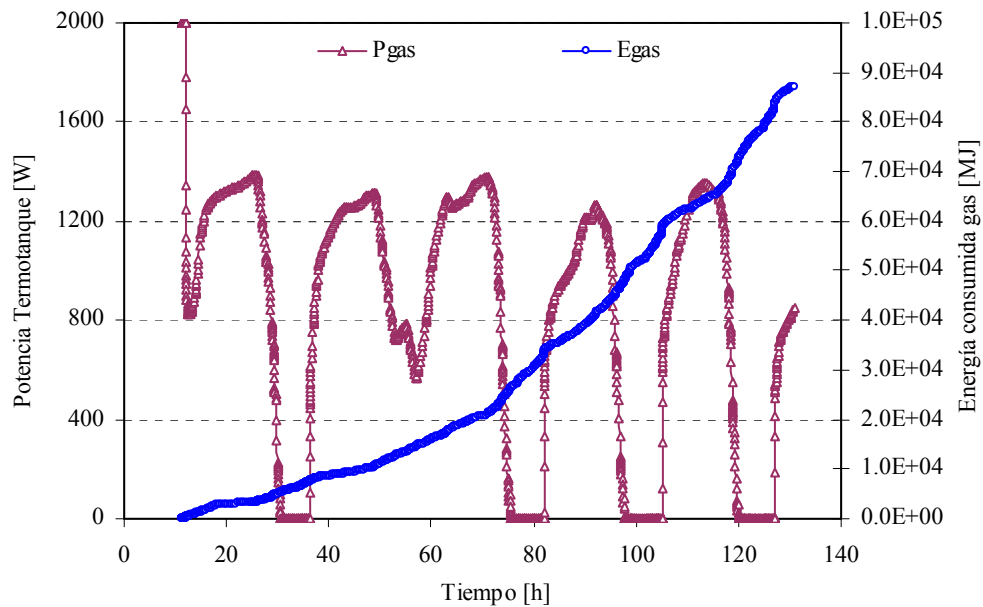


Fig.9. Potencia y energía referidas al consumo de gas

El sistema fotovoltaico simulado arrojó resultados satisfactorios, al compararlo con datos de desempeño del mismo en situaciones similares. La simulación de la curva de potencia generada por los paneles se muestra en la Figura 10.

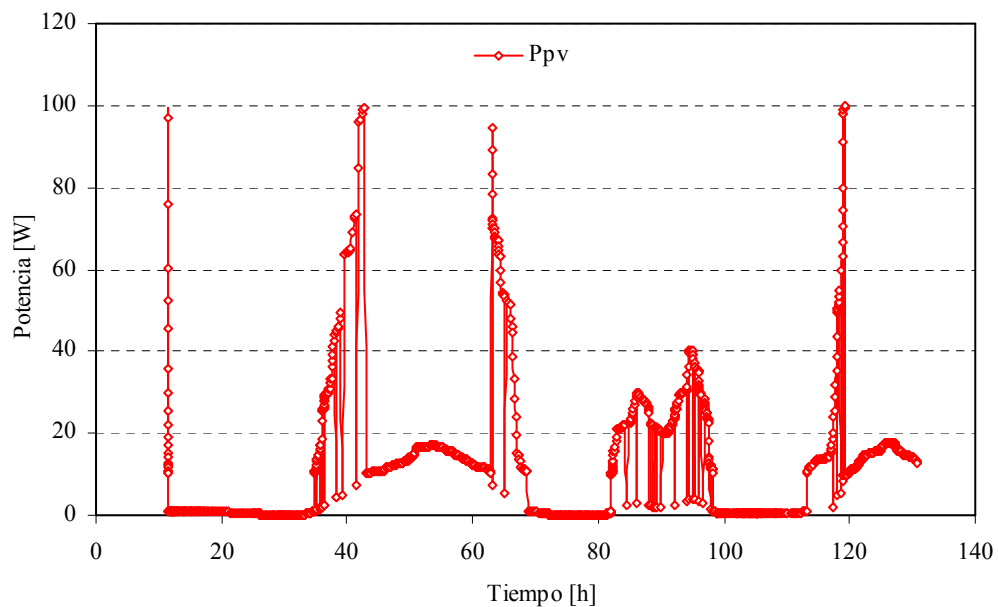


Fig.10. Potencia del panel fotovoltaico

## CONCLUSIONES

Se trata de un primer ensayo de integración con resultados satisfactorios. Los ensayos realizados con el modelo y el ajuste computacional permitieron verificar de una manera sencilla algunos coeficientes de transferencia de calor adentro de la cámara, fijándose de este modo pautas de optimización.



Se pudo establecer que el tamaño de los colectores y del tanque de reserva es insuficiente para una completa autonomía del aprovechamiento solar, aún con buen clima y radiación solar media abundante. Sin embargo, podemos asegurar que el ahorro energético estimativo es relevante.

Se pudo verificar mediante validación experimental, que la simulación del sistema fotovoltaico tiene un comportamiento muy similar al sistema físico ensayado. En una segunda etapa, se determinarán los rendimientos comparados, la autonomía del sistema y el posible ahorro de energía.

## NOMENCLATURA

$a$	Parámetro de ajuste de la curva
$E$	Energía de banda prohibida (eV)
$G$	Irradiancia ( $W/m^2$ )
$I_D$	Corriente de diodo o corriente de oscuridad (A)
$I_L$	Corriente fotogenerada (A)
$I_0$	Corriente inversa de saturación del diodo (A)
$I_{mp}$	Corriente del punto de máxima potencia (A)
$I_{sc}$	Corriente de cortocircuito (A)
$N_s$	Número de celdas en serie
$P$	Presión atmosférica (Pa)
$P_{sat}$	Presión de saturación a la temperatura de bulbo húmedo (Pa)
$R_s$	Resistencia serie (ohm)
$T$	Temperatura de bulbo seco (C)
$T_1$	Temperatura de entrada del aire a la cámara (C)
$T_2$	Temperatura de bulbo seco del ambiente exterior (C)
$T_1, T_2$	Temperaturas cercanas a $T_c$ (K)
$T_c$	Temperatura de la celda (K)
$T_{bh}$	Temperatura de bulbo húmedo del ambiente exterior (C)
$V_{mp}$	Tensión del punto de máxima potencia (V)
$V_{oc}$	Tensión de circuito abierto (V)
$W$	Humedad del aire (kg/kg)
$W_{sat}$	Humedad de saturación a la temperatura de bulbo húmedo (kg/kg)
$\varepsilon$	Eficiencia del sistema de hidrocóoling
$\mu_{Isc}$	Coefficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito (A/K)
$\mu_{Voc}$	Coefficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto (V/K)

## REFERENCIAS

- ASHRAE, Handbook Fundamentals, 1989.
- García V., A. Iriarte, G. Lesino, S. Flores y C. Matias. 2003. Comportamiento térmico de una cámara para microinjección de plantines de nogales. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, pp 08-31 08-38.
- García V., Iriarte A., Watkins M., Lesino G. y Rigotti J., 2006. Calentamiento de Camas de Enraizamiento mediante un Sistema Mixto Sol-Gas. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, pp 04-01 04-08.
- Gea M., Montero M. Y Cadena C., 2006. Simulación Eléctrica y Térmica de Paneles Fotovoltaicos. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10. pp 02-39 02-45.
- Iriarte A., Gea M., García V. y Placco C., 2006. Simulación Numérica de una Cámara Bioclimática para Microinjección de Plantines de Nogal. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, pp 08-31 08-38.
- Saravia L. y Saravia D. (2000) "Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad". Avances en Energías Renovables, Vol. 4, pp. 8.17 – 8.23.

## ABSTRACT

A set of flat solar collectors provides hot water to the microinjection camera rooting beds. When the energy provided by the panels is insufficient, it's complemented in some periods of the year with a traditional heating to gas system. One adds a hydrocooling system in summer and photovoltaic panels for the provision of electrical energy. It's studying by means of partial and general simulations, the adjustment of design and optimization of all the system, with the purpose of obtaining the maximum power independence. The present work shows a simulation that integers partial simulations fits previously. The comparative study between experimental and simulated values was satisfactory. The integrated simulation will allow in a future to prove variants in the design, avoiding expensive experimental tests.

**Key words:** microinjección camera, integrated energy simulation