

## **APLICACIÓN DE SIMUSOL PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN SOL - GAS CON CONTROL AUTOMÁTICO**

M. Watkins<sup>1</sup>, V. García<sup>2</sup>, A. Iriarte<sup>2</sup>

(1)Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – Universidad Nacional de Catamarca  
Av Belgrano 300 – 4700 Catamarca, Argentina. TE 420900 - [mwatkins@educ.ar](mailto:mwatkins@educ.ar)

(2) INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Catamarca  
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca, Argentina. [vgarcia@plab.unca.edu.ar](mailto:vgarcia@plab.unca.edu.ar)

**RESUMEN:** El presente trabajo, desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación “Uso de la Energía Solar para la calefacción de Invernaderos Especiales” muestra un estudio comparativo de configuraciones de diseño de un sistema mixto sol-gas destinado a calefacción de camas de enraizamiento. El dispositivo experimental en estudio, fue construido y ensayado en instalaciones del INTA Catamarca. La complejidad del sistema y la diversidad de variables a tener en cuenta exigieron de procesos de simulación para determinar la configuración más adecuada de conexión de los elementos constitutivos. La simulación computacional, realizada con el software Simusol, permitió realizar ajustes en el diseño. Durante el estudio se efectuaron mediciones que permitieron validar el modelo. Los resultados de la aplicación del software Simusol muestran ventajas comparativas respecto de otros procedimientos de optimización de la configuración del sistema con notable economía de recursos.

**Palabras clave:** diseño, simulación, energía solar, control automático, Simusol.

### **INTRODUCCIÓN**

Desde siempre, un buen método para resolver un problema consiste en descomponerlo en partes con el fin de estudiarlas y resolverlas por separado. Sin embargo, cuando se presentan fenómenos de sinergia, en sistemas dinámicos o cuando la complejidad es alta, la simple adición de los resultados parciales no conduce al resultado global del problema.

Este es el caso de los sistemas térmicos, al intenta aplicar mecanismos de control con líneas de retroalimentación interna. Si somos capaces de detectar los elementos pertinentes y de definir los algoritmos de cálculo que gobiernan su comportamiento, podremos establecer modelos. Dichos modelos, dentro de ciertos límites, describen la realidad que pretendemos manipular.

El proceso de diseño y optimización de un sistema sol-gas con controles automáticos, resultaría demasiado extenso para ser descrito en detalle. En consecuencia, el objetivo en este trabajo consiste en mostrar la aplicación de procesos de simulación, para determinar la manera más adecuada de interconectar los componentes de una cámara de enraizamiento cuyas fuentes de energía son: un conjunto de colectores solares de agua caliente y un termostato a gas como fuente alternativa.

Se pretende determinar el modo de interconectar tres colectores solares de agua caliente a un tanque de reserva y a las camas de enraizamiento de una cámara de propagación. Las opciones de conexión son:

En el caso “a”, todos los colectores aportan agua caliente al tanque de reserva, conectados en paralelo. El agua no ingresa a las camas de enraizamiento antes de alcanzar los 30C, siendo el termo-tanque quien provee el fluido caloportador en esos lapsos de tiempo. El termostato instalado en el tanque de reserva tiene la misión de decidir la apertura y cierre de las electroválvulas para dar paso a una u otra fuente de agua caliente.

En el caso “b”, se conecta uno de los colectores directamente a las camas y los dos restantes aportan agua al tanque de reserva. Un nuevo termostato se instala en el colector conectado directamente a las camas. Dicho artefacto determinará en que momento pasa agua caliente directamente desde el colector a las camas. Cuando la radiación es baja, el tanque de reserva provee energía al sistema.

En trabajos anteriores se desarrolló un modelo para las camas de enraizamiento (García *et al*, 2006). Sobre dicho modelo pudieron verificarse los valores de las resistencias de pérdidas conductivas, radiativas y convectivas de las mismas. Se ajustó además, el modelo representativo de los sistemas automáticos de control *todo-nada* aplicados a dichas camas (Watkins y García, 2007). Datos de comportamiento de los colectores se obtuvieron de estudios preliminares sobre colectores solares plásticos para calentamiento de sustratos (Iriarte *et al*, 2002). Otras variables, necesarias para la simulación, (temperatura ambiente y radiación solar) se tomaron experimentalmente en el interior de la cámara para completar el proceso. La temperatura de cielo se calcula empleando la fórmula de Swinbank, (Duffie y Beckman, 1980):

## MATERIALES Y MÉTODO

El sistema físico que se modela y simula (dispositivo experimental) está formado por:

- Dos colectores planos de agua de 0.80 x 2.96 m cada uno
- Un colector plano de plástico (PVC) para agua de 18 m<sup>2</sup>
- Un termo-tanque domiciliario de 110 l de capacidad con un consumo de 5,75 W, recuperación 235 l/h y una presión de trabajo de 3,4 kg/cm<sup>2</sup>
- Un tanque de reserva de agua caliente de 1000 litros, térmicamente aislado.
- Una bomba de 1/2 HP para la circulación de agua por las camas desde los colectores y el termo-tanque.
- Cama de enraizamiento de 8,00 x 0,65 m instalada en el interior de la cámara
- Tres electro-válvulas de 1 pulgada 24 V-AC
- Dos válvulas de retención.
- Dos Termostatos con rango 20 – 90C.

Las mediciones se realizan empleando un sistema de adquisición de datos constituido por:

- Una computadora con tarjetas de adquisición de datos Keithely 1600 y PClab 812.
- Sensores de temperatura tipo LM (semiconductor)
- Sensor de humedad relativa con puntas capacitivas Vaisala.
- Sensor de radiación solar interior y exterior con radiómetros Kipp & Zonen y piranómetros LICOR 200SA.
- Luxímetro LICOR analógico.
- Caudalímetro.



Figura 1: Fotografías de la cámara y de los colectores solares del dispositivo experimental instalados en INTA Catamarca.

### Metodología:

Sobre el dispositivo experimental, conectado y funcionando a modo de prueba., se realizan una serie de mediciones con la configuración “a” y se ajusta una primera simulación, en la cual se verifica que el modelo simulado se comporta adecuadamente.

A continuación se comparan los valores experimentales -medidos en puntos clave del dispositivo- con los valores de la simulación para validar el modelo. Se emplea el modelo validado experimentalmente para ensayar la configuración “b”.

### Mediciones Experimentales:

Se toman datos con el dispositivo experimental conectado según la configuración “a”, esto es con los tres colectores conectados en paralelo aportando agua caliente al tanque de reserva y tomando de este último el agua caliente para alimentar el circuito de las camas de enraizamiento.

Dichas mediciones tienen duraciones que oscilan entre las 24 y 72 horas. Los registros de temperatura, caudal, y radiación interior y exterior se realizan en forma automática cada 30 minutos. Se muestran algunos resultados en la Figura 2. La gráfica muestra las variaciones de temperatura del agua en las camas de enraizamiento ( $T_c$ ), la diferencia de temperatura entrada-salida en el termo-tanque ( $T_s - T_e$ ) y la radiación solar ( $W$ ) medida en el exterior de la cámara.

### Simulación:

Las simulaciones se realizan siguiendo las siguientes premisas:

- Se emplean datos reales de temperatura ambiente y radiación de invierno por ser la situación más desfavorable.
- Se trabaja con períodos de más de 24 horas para que el sistema entre en régimen.
- Las combinaciones de interconexión se prueban manteniendo los modelos y datos climáticos, de modo que los resultados sean comparables.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

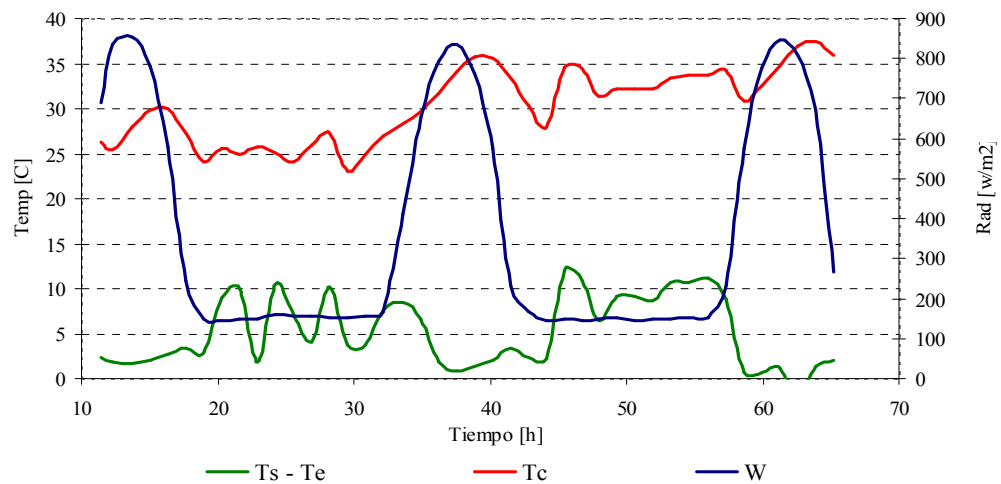


Figura 2: Datos experimentales preliminares

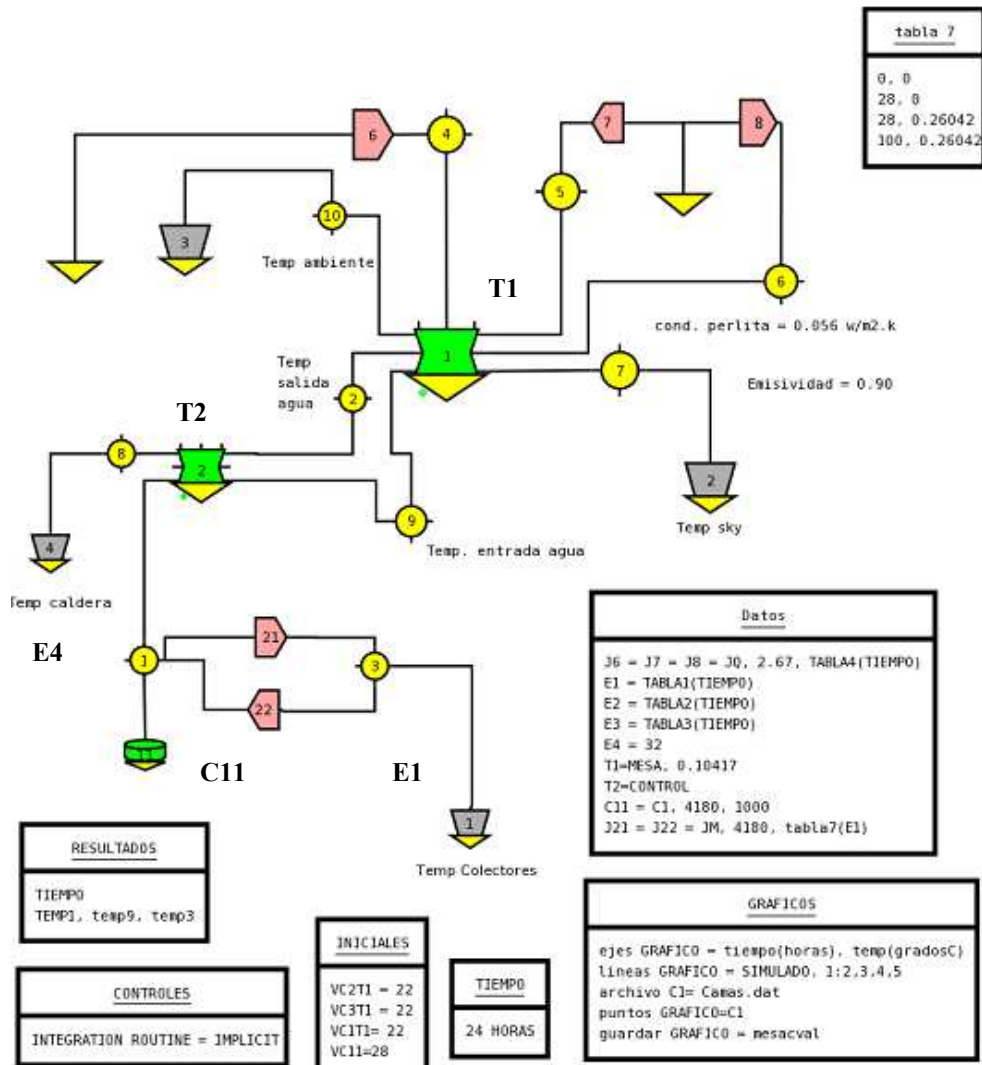


Figura 3: Esquema generado con DIA para la Hipótesis "a" de la simulación

Primera etapa de la simulación:

Esta etapa corresponde a la hipótesis de trabajo "a", esto es, todos los colectores conectados en paralelo al tanque de reserva.

La Figura 3 muestra el esquema de conexiones. Se emplearon: el modelo T1 desarrollado para las camas por García *et al* (2006), y el modelo T2 que simula el sistema automático de control del sistema mixto (Watkins y García, 2007). Los flujos de energía 6, 7 y 8 corresponden a la radiación solar interna que incide sobre las camas de enraizamiento. La fuente de temperatura E1 representa a los colectores y la fuente indicada como E2 simula a la caldera. El capacitor C11 es quien simula al tanque de reserva de agua. La simulación se completa con tablas de datos de temperatura ambiente, radiación, temperatura de cielo y temperatura de agua en los colectores.

La simulación funciona de la siguiente manera: La Tabla 7 controla los flujos 21 y 22. Mientras la temperatura en los colectores es inferior a 28 C los flujos de calor y masa 21 y 22 aportan agua al tanque de reserva. Cuando la temperatura en el tanque es inferior a 30 C, el Modelo T2 permite el paso de agua desde la caldera E4 a las camas, mientras que en los períodos de temperatura superior a 30 C es el tanque quien provee el fluido caloportador.

Una gráfica de las variaciones de temperatura, -resultado de la simulación- puede verse en la Figura 4. Se indican en la gráfica, la temperatura experimental del agua en los colectores solares (Tcol-e), la temperatura simulada en las mesadas (Tca-s) y el flujo de agua desde el termotanque a las camas (Ftt-s). La simulación del control automático funciona correctamente. Puede verificarse que cuando la temperatura en los colectores es inferior a 30 C el agua caliente es provista por el termotanque, mientras que cuando se superan los 30 C el Modelo T2 conmuta permitiendo el ingreso de agua desde los colectores. El tiempo total de aporte de agua caliente del termotanque, en la simulación es de 11 horas y 27 minutos. El tiempo medido del mismo parámetro es de 11 horas 35 minutos.

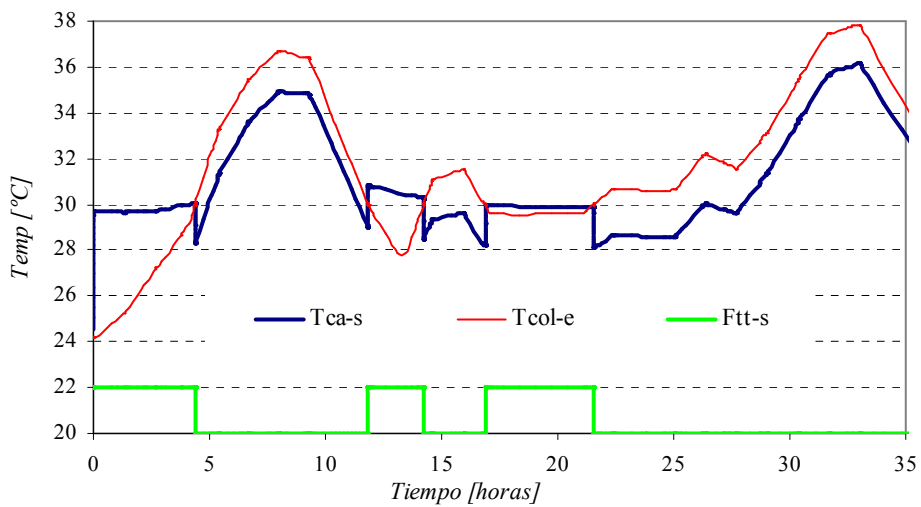


Figura 4: Curvas de temperatura en la primera etapa de simulación

#### Validación

La Figura 5 permite visualizar las curvas de temperatura simulada (Tca-s), y temperatura experimental en las camas (Tca-e). El ensayo cuyas curvas se muestran, tuvo una duración de aproximadamente 35 horas (dos días y una noche). Se realizaron dos ensayos adicionales. En todos los casos los errores fueron inferiores al 5 % y el error promedio fue del 2,42 %.

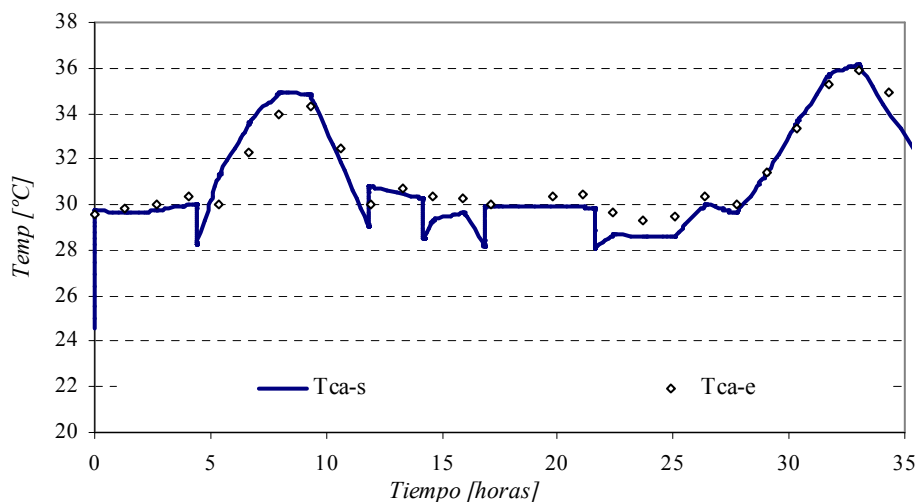


Figura 5: Curvas de validación en la primera etapa de simulación

*Segunda etapa de la simulación:*

La segunda etapa corresponde a la hipótesis de trabajo "b". La gráfica generada con DIA para el circuito que se simula puede visualizarse en la Figura 5. Uno de los colectores solares se conecta directamente a las camas a través de los flujos de calor y masa 11 y 13. Las tablas 5 y 6 controlan la circulación de agua en los mismos. Cuando la temperatura del agua, en ese colector, alcanza la temperatura de 30 C comienza a proveer fluido directamente a las camas. Mientras tanto el agua de los otros colectores a través de los flujos 17 y 18 continúa elevando la temperatura del tanque de reserva C11. Cuando la temperatura en el tanque supera los 30 C se habilita el paso desde el mismo hacia las camas.

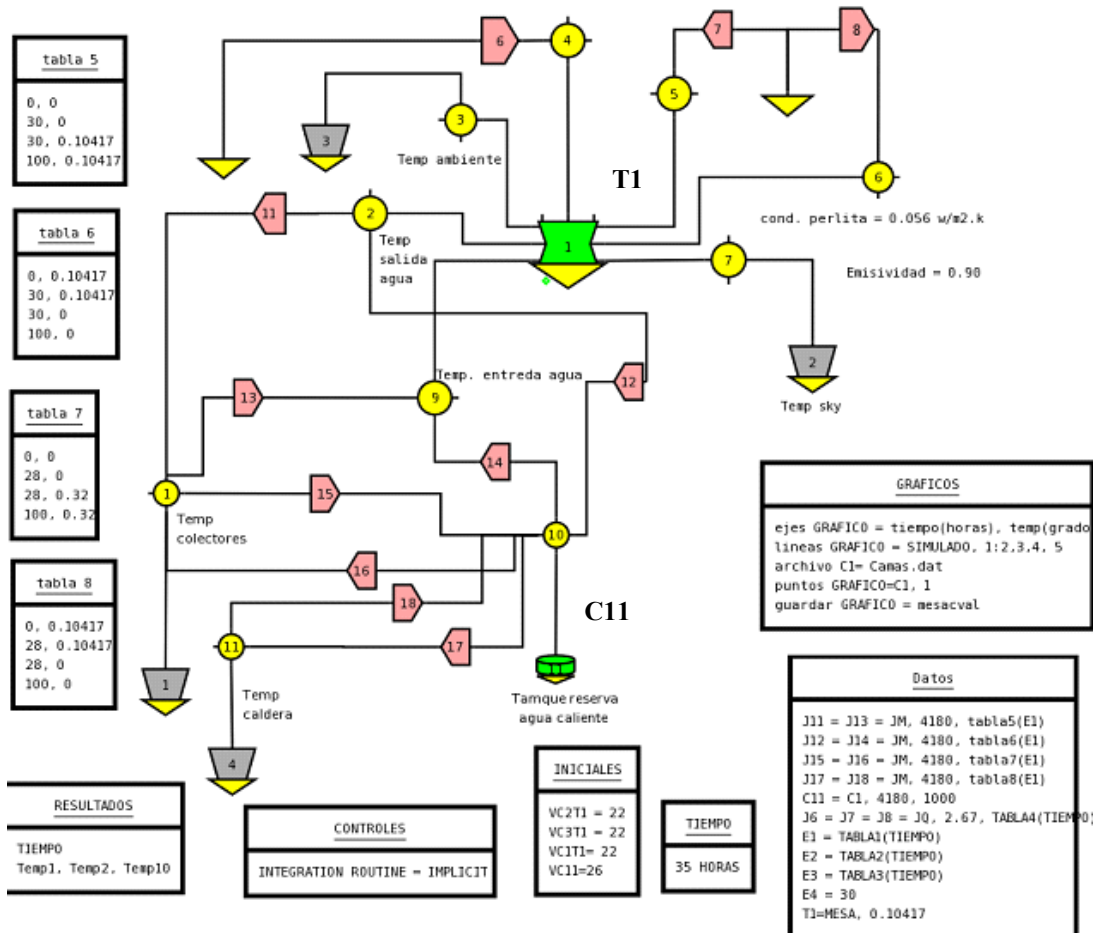


Figura 5: Esquema generado con DIA para la Hipótesis "b" de la simulación

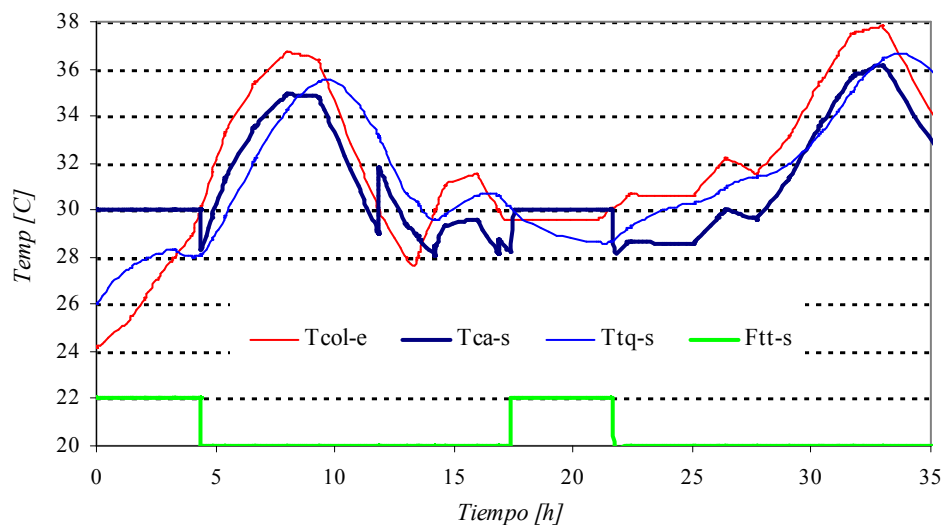


Figura 6: Curvas de variación de temperatura simulada en la segunda etapa de simulación

La Figura 6 muestra las variaciones de las temperaturas experimentales en los colectores (Tcol-e), la temperatura simulada en las camas (Tca-s) y la temperatura simulada en el tanque de reserva (Tt-s). La masa de agua que almacena el tanque hace que se produzca una demora en alcanzar la temperatura de consigna. Del mismo modo esa inercia térmica permite sostener el aporte de fluido hacia las camas cuando los colectores comienzan a enfriarse por falta de radiación.

La modificación permite un ahorro de energía en dos momentos del día, esto es, a la mañana temprano cuando aún el tanque de reserva no ha acumulado energía suficiente y al final del día cuando la radiación disminuye y la temperatura en los colectores baja.

Puede verse en la Figura 6 que hasta las 4:35 horas de comenzada la simulación el termotanque a gas provee el agua caliente. En ese momento, los colectores (Tcol-e) llegan a la temperatura de 30 C y en ese instante se produce la conmutación del sistema. Comienza a ingresar agua desde el colector directo hacia las camas, mientras los otros colectores incrementan la temperatura del tanque de reserva.

El proceso continúa hasta 12:10 horas desde el inicio, momento en que la temperatura en los colectores (Tcol-e) resulta inferior a los 30 C. El tanque de reserva provee el flujo de energía desde 12:10 hasta 17:43 horas. En este punto se deberá conectar el ingreso de agua desde la caldera, situación que continúa hasta las 21 horas y 45 minutos. El sistema ha mejorado su eficiencia, ya que son 8 horas y 40 minutos en total el tiempo de funcionamiento con caldera para un ensayo de 35 horas lo cual representa una reducción de 3:05 horas en el consumo de gas, respecto de la configuración "a".

## CONCLUSIONES

La metodología propuesta posibilitó probar dos configuraciones de diseño. Se pudieron estimar rendimientos y tiempos de funcionamiento del sistema sol-gas.

La utilidad que presenta la simulación permitió realizar estudios de la variabilidad de los procesos, balance de masa y energía en los sistemas y ajustes de diseño.

Resultó factible observar los efectos que pueden producir cambios en las variables de entrada con notable economía comparada con las mismas pruebas en el proceso real y optimización del aprovechamiento energético, con las ventajas derivadas de ahorro de energía y materia prima.

Resta aún realizar la validación de los cálculos mostrados para la segunda hipótesis de trabajo ya que no se realizaron todavía mediciones experimentales sobre ese esquema.

## REFERENCIAS:

- Creus Solé A, (1989) Simulación de procesos con PC – pág 42-58 - Edit. Marcombo.
- Duffie J.A. y Beckman, W.A. (1980) Solar Ingeneering of Termal Processes – pág 122 - Edit. John Wiley & Sons
- García V., A. Iriarte, M. Watkins, G. Lesino, J. Rigotti, (2006) "Calentamiento de camas de enraizamiento mediante un sistema mixto sol-gas" Revista Avances en energías renovables y medio ambiente, Vol. 10, pág. 02.39 - 02.45.
- Iriarte A., S. Bistoni, L. Saravia (2002) "Modelo de predicción del comportamiento de colectores solares plásticos para calentamiento de sustratos en invernaderos". Revista Avances en energías renovables y medio ambiente, Vol. 6, Nº 2, pág. 02.37 - 02.42.
- Watkins M., García V.(2007) "Simulación de sistemas de aprovechamiento solar térmico mixto con control automático"- Actas Jucen 2007 – Catamarca – En prensa

**ABSTRACT:** The present work, developed in the context of the Project "Use of the Solar Energy for the heating of Special Greenhouses" shows a comparative study of design configurations of a sun-gas system to bench heated of plant production by skate, rehearsed in the INTA Catamarca, and the computational simulation using Simusol, to optimize the design. The complexity of the system and the diversity of variables to keep in mind demanded from simulation processes for the appropriate conection of constituent elements. During the study they were carried out sampled variables that allowed to validate the pattern and to apply it to other configuration. The results of the application of the software Simusol shows comparative advantages regarding other procedures allowing the mass flows and energy, the later adjustment and optimization of the system with economy of resources.

**Keywords:** design, simulation, solar energy, automatic control, Simusol.