



INVERNADERO ACONDICIONADO CON ENERGIA SOLAR PARA RUSTICAR PLANTAS*

A. Iriarte², L. Saravia^{1,2}, C. Matias³ y L. Tomalino³

INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca, Argentina. iriarte@plab.unca.edu.ar

RESUMEN - La producción por propagación agámica o asexual mediante estacas semileñosas se realiza tradicionalmente en dos etapas, una destinada al enraizamiento y la otra al fortalecimiento radicular y crecimiento de la planta en condiciones próximas al aire libre. Este método presenta un bajo porcentaje de sobrevivencia, menor que el 45 %, debido especialmente al cambio brusco de hábitat que sufren las estacas. La solución que se propone es la incorporación un invernadero de plástico acondicionado térmicamente con energía solar como etapa intermedia del sistema de producción, para favorecer la adaptación del plantón, disminuir el estrés térmico y su estadía en la casa de vegetación (enraizamiento). El sistema se basa principalmente en coleccionar la radiación solar incidente y extraer el excedente de calor del aire del invernadero durante el día, para acumularlo y usarlo en el momento que sea necesario para calentar el aire y el suelo del mismo. En el presente trabajo se analizan los resultados experimentales y de la simulación numérica del sistema en pleno funcionamiento, utilizando una analogía térmica - eléctrica y el programa para resolución de circuitos eléctricos SCEPTRE. La desviación promedio diaria de la temperatura del aire interior al mismo fue de 1,4 °C con un error relativo promedio de 8,3 %. Se han logrado niveles de energía suficiente para asegurar un nivel térmico adecuado a las necesidades de las plantas para los días con condiciones climáticas típicas de la zona. Desde el punto de vista agronómico los resultados fueron muy satisfactorios lográndose un 100 % de sobrevivencia, una alta tasa de crecimiento y un material vegetal de excelente calidad.

Palabras claves: calefacción – invernadero- energía solar - rusticación - producción

PLANTS RUSTICATION IN A SOLAR GREENHOUSE

ABSTRACT - Production by agamic or asexual propagation using cuttings is traditionally carried out in two stages, one for rooting, and the other for root strengthening and plant growing in the open air. This method has a low percentage of survival. To reduce thermal stress and the period of staying in the vegetation house the present work proposed an intermediate step to facilitate the planton adaptation. The system is mainly based on collecting solar incident radiation and extracting air heating surplus in the greenhouse during the day and use it when necessary to heat the air and soil in the greenhouse. Experimental results and numeric simulation are analyzed using thermo – electric analogy and the program for electric circuit resolution SCEPTRE. Daily mean deviation of air temperature within the greenhouse was 14° C with a relative error average of 8.3%.. From the agronomic point of view, results were very satisfactory .

Keywords: heating – solar energy -greenhouse - rustication - production

1. INTRODUCCION

La producción en el medio rural del Noroeste Argentino (NOA) tiene requerimientos de energía térmica de cierta consideración en relación con los procesos productivos, de poscosecha y domésticos, tales como: calentamiento de invernaderos, calefacción de locales de cría, calentamiento de agua, calefacción de viviendas, etc.. Su atención mediante combustibles tradicionales incide en forma significativa en los costos finales de los productos, especialmente en las zonas alejadas donde las dificultades de transporte agravan el problema.

La expansión de la demanda de plantines de árboles frutales de olivo (*Olea europaea L.*), higuera (*Ficus carica L.*) y nogal (*Juglans regia L.*), ha generado la instalación de viveros con técnicas de producción tradicionales, con un elevado costo (mano obra e insumos) y con tiempos de producción superiores a dos años. Algunos viveristas han recurrido a nuevas técnicas de propagación vegetativa bajo niebla inducida (propagación asexual) incorporando sistemas de calentamiento y enfriamiento convencionales, como solución al problema. Estos viveros que usan la técnica de propagación agámica mediante estaquillas semileñosas, emplean dos etapas para la producción de plantas (Hartmann *et al.*, 1971). La primera etapa, esta destinada a lograr la formación de raíces en las estacas (enraizamiento), en un medio inerte (perlita) dentro de una casa o cámara de vegetación con temperatura y humedad controlada. La segunda etapa se realiza bajo malla de media sombra para mejorar y adaptar el funcionamiento del

* Parcialmente financiado por ANCyT, UNCa, INTA

1. INENCO, Instituto UNSa-CONICET

2. Investigador del CONI CET

3. EEA, INTA – Catamarca

sistema radicular y lograr el crecimiento de la planta (endurecimiento y crianza) en condiciones próximas al aire libre. Este método presenta la dificultad de que el cambio de hábitat de la estaca recién enraizada (barbado) e implantada en una maceta, entre la primera y segunda etapa, es muy brusco, produciendo una mortandad mayor del 55 % (Matias, 1998). Asimismo en estas condiciones, para asegurar el 45 % de sobrevivencia, es necesario mantener a las estacas ya enraizadas en macetas en el interior de la cámara de vegetación unos 60 días más. Esto ocasiona un mayor gasto de energía por plantín y disminuye la cantidad de plantas logradas anualmente, encareciendo por tanto el proceso de producción.

La solución que se plantea para resolver este problema es incorporar al sistema de producción una etapa intermedia de adaptación de la planta que permita disminuir el estrés higrótérmico, disminuir su estadía en la casa de vegetación y lograr mayor productividad. Por otro lado, si en esta nueva etapa se incorporan sistemas de aprovechamiento de energías no convencionales, los costos energéticos de funcionamiento bajarían considerablemente, aumentando la rentabilidad del proceso. La propuesta esta relacionada con lograr el endurecimiento o rusticación de una mayor cantidad de estacas y un menor tiempo de permanencia en la cámara de vegetación, mediante la utilización de un invernadero de plástico (invernadero rusticadero) acondicionado térmicamente con energía solar.

En general las propuestas referidas al calentamiento por vía solar suelen ser de tres tipos: a) uso del propio invernadero como colector y acumulador; b) colectores solares internos y acumulador interno o externo; c) colectores y acumulador externo, independientes del invernadero. En este sentido, Damagnez *et al.* (1975), incorporaron en la cubierta de un invernadero un sistema compuesto por dos láminas de plástico rígido o vidrio, por cuyo interior se hacía circular una solución de CuCl_2 . Si se dispone de una fuente fría es factible refrigerar la cubierta en caso de ser necesario (Chiapale, 1981). La ventaja de estos sistemas es que no ocupan lugar adicional y filtran la radiación inútil para las plantas. Presentan la desventaja que disminuye la temperatura interior y que una pérdida de líquido (solución) puede ser muy perjudicial para las plantas y el suelo.

Bolsas colgadas transparentes y negras con agua (Saravia *et al.*, 1988 e Iriarte *et al.*, 1989) y tubos de calefacción de suelo (mangas plásticas flexibles de PVC), "acolchado radiante", dispuestos en la entre las líneas de cultivo (Grafiadellis, 1990) son algunas alternativas para coleccionar - acumular calor dentro del invernadero y aumentar la inercia térmica. Otras propuestas se detallan sintéticamente a continuación: Oliverti *et al.* (1995) utilizaron la energía colectada a través de calentadores solares de agua para la calefacción de una casa de vegetación de 1750 m³ para la producción de plantas. Los colectores tipo "heat pipe" (91,2 m²) están en el exterior del recinto de producción con un acumulador de agua de 500 m³, ubicado debajo de la superficie del suelo. Santamouris *et al.* (1995) propusieron utilizar el calor excedente en un invernadero durante el día para acumularlo en el suelo mediante la recirculación del aire caliente a través de intercambiadores calor aire - tierra (tubos enterrados). Saravia *et al.* (1996) presentaron un diseño de un sistema de cultivo hidropónico en un invernadero acondicionado térmicamente con aprovechamiento de energía solar. Utilizan colectores - intercambiadores de plástico para calentar una solución

nutritiva hidropónica, un acumulador de calor en lecho de piedra y una cortina deslizable de malla aluminizada. Bascentinelik *et al.* (1997) utilizaron el almacenamiento de calor por cambio de fase (parafina) para la calefacción de un invernadero de 180 m². Iriarte *et al.* (1997) estudiaron la calefacción de un invernadero con cubierta de vidrio mediante 20 m² de colectores - intercambiadores de plástico (bolsas) colocadas en la parte superior del invernadero, combinado con un sistema de calentamiento de agua con gas como combustible.

La disminución de las pérdidas nocturnas y la utilización del excedente de calor producido por la radiación incidente durante el día, sumado al ahorro y uso racional de la energía térmica obtenida, son los ejes fundamentales del diseño realizado para el Invernadero Rusticadero Solar, integrado al proceso de producción de plantas. En el presente trabajo se describe el sistema construido y se analiza la modelización realizada utilizando una analogía térmica - eléctrica. Se discuten los resultados obtenidos de la simulación, en contraste con los obtenidos experimentalmente.

2. INVERNADERO RUSTICADERO

El sistema construido en el predio del Estación Experimental Agropecuaria del INTA - Catamarca, Argentina (28,30 Latitud Sur, 66° Log. Oeste, 600 m s.n.m.) está constituido por (figura 1): a) invernadero doble cubierta; b) colectores solares interiores; c) acumulador de agua caliente; d) canchales calefaccionados; e) caloducto; f) acumulador de calor en lecho de piedra.

Estructura del invernadero: el invernadero está formado por dos estructuras tipo macrotúnel de 7,5 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. Ambas estructuras conforman un macrotúnel doble. En el interior de cada módulo, a 2 m de altura, se ha instalado una segunda cubierta de plástico térmico con pendiente hacia la unión de los dos macrotúneles. Las cubiertas, los laterales y los frontales son de polietileno de 150 micrones de espesor con aditivo que filtran el U. V. y parcialmente opaco entre 700 y 1400 nm, con una transmitancia global de 0,88.

Colectores solares y acumulador de agua caliente: las placas de los colectores solares están construidas con bolsas de polietileno cada uno de 0,50 m de ancho por 1,8 m de largo, y soldadas transversalmente de manera tal que el agua que ingresa por la parte superior cae por gravedad haciendo un recorrido en forma de zig - zag. Los colectores solares Norte están formados por una doble pared de plástico de larga duración térmica con protección U.V., en cuyo interior se colocaron las bolsas de plástico transparentes y negras alternadamente. Esta disposición permite usar la pared del invernadero como cubierta del colector solar.

En la pared lateral Sur de la cámara, paralelo a la pared de plástico del invernadero, se instalaron colectores solares de polietileno negro. Estos colectores interceptan la radiación solar que de otra manera se perdería a través de esta pared y posibilitan el intercambio de calor del entre el aire interior del ambiente y el agua, como una forma de contribuir el calentamiento de esta última. En ambos casos, lateral Norte y Sur, constituyen una doble pared lateral para el invernadero, disminuyendo las pérdidas del invernadero.

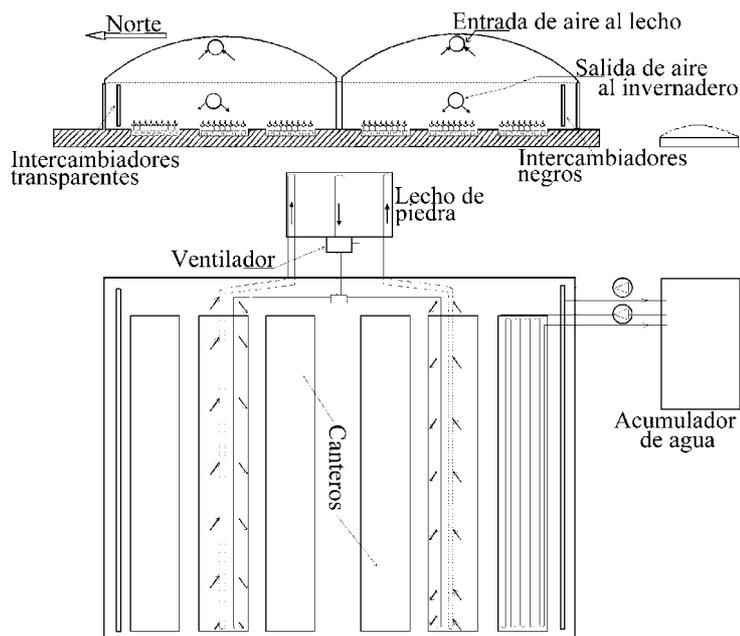


Fig. 1: Corte y planta del invernadero rusticadero

En el lado Norte se instalaron 22 placas colectoras transparentes ($17,6 \text{ m}^2$) y 21 negras ($16,8 \text{ m}^2$) configurando una superficie colectora de $34,4 \text{ m}^2$ y del lado Sur, 40 negras con una superficie de colección de 32 m^2 . Asociado con estos colectores solares se ha construido un reservorio de agua bajo tierra en el exterior del invernadero para la acumulación del agua caliente. En la base del pozo entre la membrana impermeable y la tierra se agregó $0,20 \text{ m}$ de arena y en los laterales aislación térmica. El volumen útil del reservorio acumulador de agua caliente es de 15 m^3 .

Canteros calefaccionados: son zanjas de 1 m de ancho por $0,20 \text{ m}$ de profundidad construidas a lo largo del eje del invernadero. Los costados están recubiertos con ladrillos y revocado. Un conjunto de tubos de poliestireno negro ($\phi = 0,0125 \text{ m}$) ubicados en paralelo y separados $0,05 \text{ m}$ entre sí, constituyen el intercambiador de calor agua - maceta en la base del cantero. Por el interior de los tubos circula agua caliente que intercambia calor con la base de las macetas que contienen las plantas.

Caloductos y acumulador de calor del aire: El conducto recolector del aire caliente (caloducto) está ubicado en la parte superior del invernadero y fue construido en chapa metálica de $0,15 \times 0,15 \text{ m}$, pintada de negro. Dispone de rendijas en la parte superior para aspirar el aire más caliente. El sistema de acumulación de aire caliente es un lecho de piedra, construido por piedra seleccionada, "tipo bola", de $0,035 \text{ m}$ de diámetro. Esta formado por dos cuerpos de $6,75 \text{ m}^3$ cada uno, con dos conductos laterales (tipo plenos) y uno central, por donde ingresa y sale el aire respectivamente. Las paredes laterales y la parte superior han sido aisladas térmicamente. El aire caliente succionado de la parte superior del invernadero entre las dos cubiertas, por un ventilador a través del caloducto, atraviesa cada cuerpo del lecho de piedra y es impulsado hacia el interior del invernadero durante el día. Durante la noche el aire del interior del invernadero es recirculado a través del lecho. El acumulador de piedra está ubicado en exterior al invernadero, en el sector Este.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Sistema de medición y control: Para la medición de los parámetros característicos se usaron los siguientes sensores: a) temperatura: termopares de cobre - constantán en canteros, macetas y colectores plásticos; semiconductores LM35 en aire y agua; termistores de $10 \text{ k}\Omega$ en la estructura metálica, cubiertas de plástico y suelo, calibrados a $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$; b) humedad: puntas capacitivas Vaisala $\pm 2 \%$; c) radiación: piranómetros calibrados Kipp & Zonen $\pm 2,5 \%$; Black & White $\pm 2,5 \%$ y LICOR 200SA $\pm 3 \%$. El monitoreo del invernadero se realizó con un sistema analógico/digital NUDAM y dos tarjetas de adquisición de datos Keitley 1600 y PCLab 812 de 16 canales analógicos de entrada y 8 canales digitales de salida, cada una instaladas en una computadora PC/AT. Los software desarrollados permiten comandar un circuito lógico con relay que controla los contactores de las bombas y del ventilador.

El sistema de control se basó en la comparación de tres parámetros: temperatura de referencia, temperatura del ambiente interior del invernadero y la hora del día. La temperatura de referencia (T_{ref}) es la temperatura de una placa de hierro ($0,04 \text{ m}$ de alto, $0,04 \text{ m}$ ancho y $0,005 \text{ m}$ espesor) pintada de negro y aislada del ambiente del invernadero en el frente mediante un vidrio y por la parte de atrás con una placa de poliestireno expandido de $0,05 \text{ m}$ de espesor. Esta ubicada en la parte superior del invernadero entre las dos cubiertas. Esta temperatura se utiliza para que la computadora determine si el sistema de colectores tiene posibilidades de absorber energía solar o no. El programa de control tiene subrutinas que contemplan si es de día o de noche, si salió el sol o está nublado.

Rutina de funcionamiento: se tuvo en cuenta lo siguiente: 1) durante el día: si hay radiación y la hora esta comprendida entre las 9 y las 18 horas, el sistema de control pone en marcha el banco de colectores y controla cada 10 minutos si la diferencia de temperatura entre la entrada y

salida de agua del colector es positiva o negativa. En caso de ser negativa detiene la electrobomba, luego de un tiempo de espera la vuelve a poner en funcionamiento. Si la temperatura de la parte superior del invernadero es mayor que la temperatura del aire a la salida del lecho de piedra, se pone en funcionamiento el ventilador aspirando aire caliente desde esta región y almacenándolo en el lecho. Tiene igual sistema de control que para los colectores solares; 2) durante un día nublado o de noche: si la temperatura del invernadero es menor que 12 °C, se enciende el ventilador del lecho de piedra para iniciar la circulación de aire hacia el interior del invernadero. Los colectores solares no funcionan en esta situación. Asimismo, cuando la temperatura dentro del invernadero supera los 16 °C, se apaga el ventilador. También dispone de una rutina especial para detener el ventilador cuando la temperatura de salida del lecho es menor que 7 °C. Por otro lado, en cualquier momento, si la temperatura de la base de las macetas en los canteros es igual o menor que 14 °C funciona una electrobomba que produce la circulación de agua caliente a través de los mismos. Si la temperatura de la base de las macetas supera 18 °C, la bomba deja de funcionar.

4. MODELO DE SIMULACIÓN

4.1. Analogía térmica - eléctrica

Basándose en la ley de Ohm, que relaciona la intensidad de corriente (I) con la diferencia de potencial (V) y la resistencia eléctrica (R), puede establecerse una analogía eléctrica entre el flujo térmico y la intensidad de corriente. A continuación se detalla la definición de cada elemento en el marco de una analogía eléctrica ampliada, que se empleará para realizar los balances térmicos en las distintas componentes del rusticadero:

R - Resistencia: representa los mecanismos de transferencia del calor. En algunos casos, como el de intercambio radiativo la resistencia no es lineal.

C - Condensador: representa la acumulación térmica sensible. La energía acumulada se calcula respecto a una temperatura de referencia. De esta manera, la diferencia de temperatura es entre el nodo que se conecta el acumulador y la temperatura de referencia. Para tener en cuenta este aspecto, todos los condensadores se conectan a un mismo nodo con potencial de referencia cero (tierra).

E - Fuente de tensión: representa un valor de temperatura conocido, el que puede ser constante o variar con el tiempo. Las fuentes de tensión deben estar referenciadas a tierra (cero de la escala Celsius). En el caso de ser necesario, como en los intercambios radiativos donde las temperaturas están expresadas en Kelvin, conviene referenciar a - 273,15 °C. Esto se puede hacer analíticamente introduciendo la diferencia de 273,15 °C en las expresiones o dentro del circuito eléctrico introduciendo un nodo extra con una fuente de tensión cuyo valor sea -273,15 °C, conectado a tierra.

J - Fuente de corriente. Se pueden distinguir dos tipos:

- Fuentes de corrientes que representan un flujo de calor o a un flujo de masa, por ejemplo:
 - Flujo de calor conductivo a través de una pared.
 - Flujo másico de aire convectivo natural o forzado.
 - Flujo másico de agua convectivo natural o forzado.
- Fuentes de corrientes exteriores al circuito que aportan una cantidad de potencia al mismo. La radiación solar incidente sobre una superficie es un ejemplo de este tipo de fuente de corriente y también

todo flujo de energía por unidad de tiempo que ingresa al sistema.

La analogía planteada solo contempla elementos térmicos donde se puede identificar una temperatura bien definida para cada elemento, como es el caso de una pared plana unidimensional a cuya superficie se le asigna una única temperatura o un acumulador con un fluido que homogeniza su temperatura por convección. La analogía puede extenderse hasta cierto límite en el caso de que exista una distribución continua de temperatura.

Para el realizar el análisis del circuito eléctrico asociado a un determinado proceso térmico es necesario: a) asignar a cada nodo un nombre único alfanumérico arbitrario, no mayor de cinco caracteres; b) dar a cada elemento del circuito un nombre exclusivo en el que la primera letra identifique la componente, de acuerdo con lo que se especificó precedentemente (R,C,E,J); c) elegir adecuadamente las unidades para los parámetros; d) elegir una corriente arbitraria en cada elemento del circuito. Indicar la dirección del flujo de corriente positiva, en cada fuente de corriente y en cada fuente de tensión.

Como existen elementos que tienen comportamientos bien diferenciados según sea el proceso de intercambio de calor, se ha adoptado el criterio de usar la inicial obligatoria precedente, seguida de letras adicionales que caracterizan dicho proceso. Así por ejemplo, existen resistencias (R) relacionadas con fenómenos conductivos, convectivos o radiativos, para los cuales se utilizarán las letras adicionales D, V y R respectivamente (RD, RV, RR). Otro caso es la fuente de corriente que representa un flujo de energía. Si está definida en términos energéticos, como es el caso de la radiación solar, se le adiciona la letra Q (JQ) y si está ligado a un flujo de masa se adiciona la letra MQ (JMQ).

También existe el caso especial destinado a medir temperatura de un nodo o entre dos nodos (termómetro), en cuyo caso se le agrega la letra T (JT). Para ello se puede usar una fuente de corriente de valor nulo y medir la diferencia de potencial de la fuente, es decir la temperatura buscada. La temperatura de un nodo será la diferencia de potencial VJT. Estas fuentes se conectan a tierra ya que funcionan referidas al cero de la escala Celsius. En el caso radiativo es necesario disponer de temperaturas en Kelvin, lo que se logra referenciando el termómetro a -273.

4.2. Modelo circuital: Invernadero con doble cubierta

Para realizar el balance de energía en el invernadero doble cubierta se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) El aire dentro del invernadero está mezclado, no hay gradientes verticales
- b) Las plantas en el interior del invernadero están a la misma temperatura del aire
- c) El invernadero se encuentra totalmente cerrado, no hay intercambio por ventilación, solo por infiltraciones (2 renovaciones/hora)
- d) No hay condensación en las cubiertas
- e) Se supone que no hay reflexiones en las cubiertas ni en el piso
- f) La transferencia de calor en el suelo es solo en la dirección vertical. Desde la superficie hasta los 0,50 m

se ha dividido en tres capas, el extremo inferior se supone a 18 °C.

La representación circuital del invernadero incluye intercambios convectivos, conductivos, radiativos y de renovaciones de aire (infiltraciones), así como elementos de acumulación y aporte de energía solar por mecanismos directos e indirectos. Los procesos de evapotranspiración, condensación y todos los fenómenos asociados con la presencia de humedad no se consideraron en forma explícita y se incluyen dentro del ajuste con los datos experimentales.

En el modelo circuital (figura 2), se han ubicado nodos en el ambiente exterior, cobertura exterior, cubierta interior, aire entre las dos cubiertas, aire entre la cubierta interior y la superficie del suelo. A este último se lo considera formado por tres capas hasta el nivel que tiene temperatura constante. La temperatura constante se representa con una fuente de tensión constante (E54) referida a masa. 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 (C51, C52, C53) con una capacidad equivalente al producto entre el calor específico de la tierra y la masa de cada capa, lo que representa la acumulación sensible en el suelo para las diferentes capas.

Como los flujos de calor debido a los intercambios convectivos, conductivos y radiativos pueden asociarse a las corrientes que circulan por las conexiones, el intercambio convectivo entre la cubierta superior y el ambiente exterior es la corriente (IRV56) que circula por la resistencia RV56. Los flujos de calor debido a estos intercambios son:

- ❖ convectivos entre el invernadero y el ambiente exterior: $q_{cv} = IRV56 + IRV57$ (1)

- ❖ perdido con conducción: $q_{cd} = IRD52 + IC51$ (2)

- ❖ perdido debido a los intercambios radiativos: $q_{rr} = IRR59 + IRR63 + IRR64$ (3)

Las fuentes de corriente que representan el flujo de energía solar absorbida por cada elemento son:

- ❖ la cubierta exterior: $JQ55 = \alpha_{c1} I_{h,ex} A_{c1}$ (4)

- ❖ la segunda cubierta: $JQ56 = \tau_{c1} \alpha_{c2} I_{h,ex} A_{c2}$ (5)

- ❖ el suelo: $JQ57 = \tau_{c2} \alpha_s I_{h,ex} A_s$ (6)

Los modelos circuitales de las componentes del invernadero fueron realizadas teniendo en cuenta los consideraciones precedentes (Iriarte A., 2001).

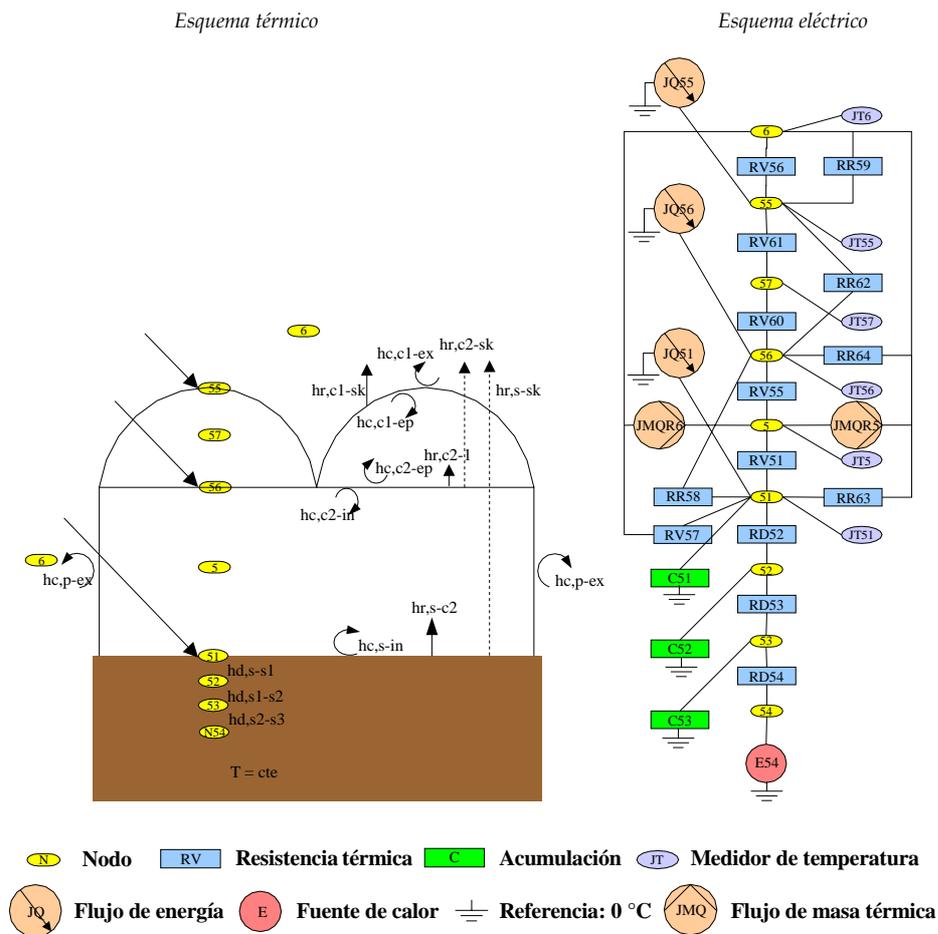


Fig. 2. Esquema y circuito del invernadero doble cubierta

4.3. Programa de cálculo SCEPTRE

El Sceptre es un programa escrito en FORTRAN para el análisis de circuitos eléctricos que permite: a) proporcionar una respuesta transitoria, alterna y continua de circuitos eléctricos constituidos por elementos lineales y no lineales (resistencias, condensadores, etc.), representando flujos térmicos no lineales tales como los radiativos y algunos convectivos; b) resolver circuitos complejos, con varios cientos de nodos; c) el uso de variables y ecuaciones representativas de las propiedades de los elementos que sean funciones de dichas variables, dando lugar a una descripción sencilla de elementos no eléctricos; d) disponer de librerías de modelos que pueden ser usados en forma repetitiva en el circuito sin necesidad de volver a describirlos; e) la descripción de los datos que definen el circuito mediante un archivo escrito en ASCII de muy sencilla confección.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Validación del modelo

Los coeficientes convectivos, conductivos y radiativos, así como los coeficientes de absorción de la radiación solar, que se utilizaron en los programas del SCEPTRE, fueron calculados teniendo en cuenta las propiedades físicas y térmicas de cada uno de los materiales que se utilizaron para su construcción (Godbey L. *et al.*, 1979, Janjai S. *et al.*, 2000, Iriarte A., 2001).

Para realizar la validación del modelo con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos, se tuvo en cuenta que las condiciones de funcionamiento de una determinada componente del sistema está ligada al resto del mismo y depende de los aportes o reducción de calor de las otras componentes.

Los ajustes se realizaron con los flujos principales que participan en el proceso de transferencia de calor y teniendo en cuenta que estos están absorbiendo otros errores de cálculo de menor envergadura. Por ejemplo, para realizar el

ajuste de la temperatura del ambiente interior al invernadero se incorporaron en los nodos correspondientes (figura 2), todas las componentes que integran el invernadero rústico solar como fuentes de tensión con los valores de temperatura medidos experimentalmente, así como las tablas que controlan su funcionamiento. De este modo el nodo 5 recibe una contribución de calor directa del acumulador en lecho de piedra y mediante mecanismos de transferencia de calor desde los colectores solares Norte y Sur e intercambiadores de calor de los canteros. Estos últimos aportan calor a las macetas y al nodo 52.

Los ensayos que se utilizaron para la validación del modelo correspondieron a tres días consecutivos, caracterizados por los niveles de temperatura mínima diaria. El factor de absorción de la radiación incidente sobre las dos cubiertas del invernadero fue la variable principal de ajuste, obteniéndose un valor de 0,36 sobre el piso. En la figura 3 se muestra la radiación solar incidente sobre superficie horizontal al nivel de piso ($R_{a,in}$) y la temperatura del ambiente del invernadero ($T_{a,in}$), obtenidas experimentalmente (E) y simuladas (S) por el modelo.

El valor absoluto de la desviación promedio entre la radiación experimental y la del modelo fue de 11 W m^{-2} con un error relativo respecto del valor experimental del 10 %. La divergencia promedio diaria en valor absoluto entre la temperatura del ambiente interior del invernadero medida experimentalmente y la obtenida mediante el modelo fue de 1,7, 1,2 y 1,3 °C con un error relativo de 10,4, 7,6 y 6,9 % para cada día respectivamente. El valor del error en el primer día es más alto que los otros dos debido a una pequeña deformación no justificada en la curva experimental. El promedio de la desviación de los dos últimos días fue de 1,21 °C con un error relativo promedio del 7,2 %, mientras que para los tres días fue de 1,4 °C, con un error de 8,3 %. En la tabla 1 se muestran las desviaciones entre los valores experimentales y los simulados y los errores relativos (E_r) de las componentes del sistema.

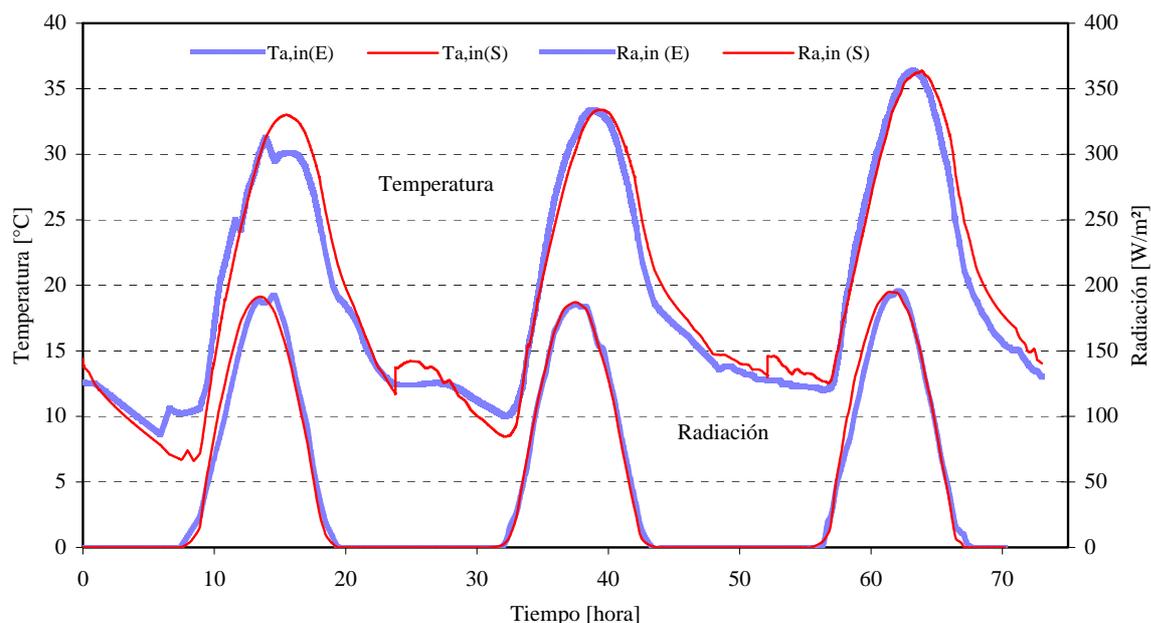


Fig. 3: Valores experimentales y simulados de Radiación global incidente sobre superficie horizontal al nivel del piso interior y temperatura del ambiente interior al invernadero.

Tabla 1. Variables y error relativo del ajuste en cada una de las componentes

Componentes	Variable	Desviación	Er [%]
Colector norte	Temperatura de agua a la salida	0,22 °C	0,7
	Máxima eficiencia Instantánea	0,006	1,5
Colector Sur	Temperatura de agua a la salida	0,42 °C	1,74
	Máxima eficiencia instantánea	0,003	1
Colectores-acumulador	Temperatura agua acumulador, periodo diurno	0,46 °C	2,6
	Temperatura agua acumulador, periodo nocturno	0,70 °C	1,7
Canteros	Temperatura en la base de la maceta	0,38 °C	1,8
Caloductos	Temperatura del aire a la salida del caloducto	0,74 °C	2,5
Acumulador en lecho de piedra	Temperatura del aire a la salida del lecho	1,2 °C	6,8
	Energía cargada	6,8 MJ	2,8
	Energía descargada	4 MJ	6,9

Con respecto al comportamiento experimental de las distintas componentes se destaca que el agua caliente del acumulador al inicio del 1er. día (10 hora local) dispone de 541 MJ, los colectores solares entregan durante el día 257 MJ. Al finalizar el día, el acumulador dispone de 766 MJ, lo que implica una pérdida de energía durante la carga de 32 MJ (12,5 %). Durante la noche el acumulador entrega calor a los canteros y pierde calor por su perímetro y cubierta en el orden de 173 MJ, que comparado con lo acumulado durante el día indica un exceso de carga de 9 MJ, en consecuencia el acumulador tiene al día siguiente a las 10 horas 550 MJ. El coeficiente global de pérdida promedio para el acumulador durante el periodo nocturno fue de $9,2 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$, calculado para varios días sin extracción de calor.

Asimismo, la estimación promedio del aporte térmico diario a las macetas por parte del sistema de intercambio de calor fue de 12 MJ por cantero para días donde la temperatura de las raíces fue menor que 14 °C, límite estipulado para el funcionamiento del sistema de calentamiento. El coeficiente global promedio de transferencia de calor del sistema de calentamiento con respecto al aire interior al invernadero fue de $2,5 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ para un caudal de circulación de agua por el interior de los tubos de intercambio de $0,24 \text{ kg s}^{-1}$ (864 kg s^{-1}) por cantero.

El comportamiento térmico del acumulador de aire caliente mostró, para un día con temperatura mínima exterior al invernadero de 2,8 °C, inferior a la temperatura mínima de diseño (5 °C), que la temperatura del aire interior al invernadero se mantiene por encima de los 7 °C, valor fijado como límite mínimo. La energía cargada durante el día en lecho de piedra fue de 61 MJ, la extraída durante la noche fue de 34,5 MJ, obteniéndose un exceso de carga en el ciclo completo de 26,5 MJ disponibles para el día siguiente. La efectividad promedio del caloducto durante las horas de carga fue del 36 %.

5.2. Simulación del invernadero rusticadero solar

Una vez ajustados todas las componentes del invernadero rusticadero solar, incluida la temperatura del ambiente interior del mismo, se integraron todas las componentes del invernadero solar en un solo programa con controles automáticos. Como datos para correr el programa se utilizaron la radiación solar incidente exterior sobre superficie horizontal y vertical y la temperatura del ambiente exterior al invernadero, así como las condiciones iniciales correspondientes a cada uno de los elementos.

En la tabla 2 se especifican los flujos de pérdida promedio [H] por cada mecanismo de transferencia de calor, así como la demanda de energía [D] para dos temperaturas internas del invernadero. Los porcentajes de pérdida entre los distintos mecanismos evidencian que la pérdida por radiación infrarroja es importante y significa el 61,2 % del total perdido. La convección y la infiltraciones registran pérdidas del 11,9 y 26,9 %. El suelo contribuye con un 32,3 %. La demanda de energía neta es de 754,9 MJ. En este caso el tiempo de calefacción es de 13,8 horas.

Para los dos períodos de ensayo, con y sin canteros se muestran en la figura 4, los valores de las temperaturas promedio simuladas del acumulador ($T_{w,acum}$), salida del aire del lecho ($T_{a,sL}$), base de la maceta ($T_{b,m}$) y ambiente interior ($T_{a,in}$), en contraste con las temperaturas del ambiente exterior ($T_{a,ex}$) al invernadero. La temperatura del acumulador de agua se grafica solamente mientras se requiere de agua caliente del reservorio para la recirculación a través de los intercambiadores de los canteros y calentar las macetas (1er. periodo).

La desviación entre los valores obtenidos experimentalmente y los simulados fue en promedio para seis días de 1,5 °C, con un error del 8 %, siendo los tres primeros días con temperaturas mínimas muy por debajo de la temperatura de diseño, mientras en el otro grupo de días las temperaturas son próximas al día típico. En ambos casos, experimental y simulado, se observa la variación de la pendiente de la curva que representa la temperatura de las macetas como consecuencia del aporte de calor del sistema de calefacción (primera serie).

Se advierte que a pesar de que la temperatura ambiente exterior fue de - 5,3 °C, la temperatura mínima de las raíces de los plantines dentro de las macetas fue de 12,2 °C, mientras que el suelo no calefaccionado fue de 7,6 °C. También este tipo de cambio se observa en la curva correspondiente a la temperatura del aire interior al invernadero en concordancia con el inicio del funcionamiento del acumulador de piedra. En el segundo grupo de días también ocurre, debido a que la temperatura del ambiente interior baja de los 12 °C y se inicia el aporte de calor proveniente de los lechos de piedra. En el último día, el comportamiento del invernadero está dentro de los límites planteados como hipótesis de diseño. Es claro que para los días cuyas temperaturas del ambiente exterior son menores que 2 °C es necesario aportar calor auxiliar al interior del invernadero.

Tabla 2. Pérdidas promedio y demanda de energía nocturna

	Ta,in = 12 °C		Ta,in = 15 °C	
	H [kW]	D [MJ]	H [kW]	D [MJ]
total IRV	2,4	133,2	3,1	161,6
total IRR	13,3	680,4	15,6	802,1
total IRD	-8,3	-361,4	-6,3	-304,2
total JMQ	5,5	300,2	7,4	378
Total neto	12,9	754,9	19,8	1037,5
	Pérdida total = 1116,4 MJ		Pérdida total = 1341,7 MJ	
	Tiempo de calentamiento = 13,8 h		Tiempo de calentamiento = 13,8 h	

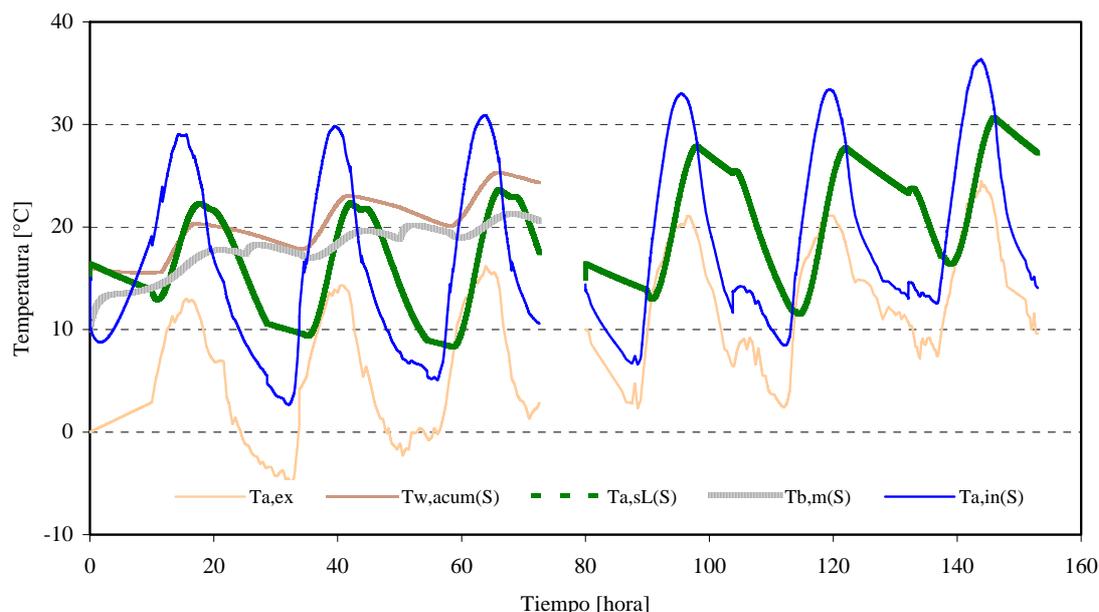


Fig. 4: Temperaturas simuladas de las componentes del invernadero rústico solar

Los datos experimentales obtenidos permiten fijar como límite confiable para los plantines de olivo recién enraizados, una temperatura mínima biológica radicular de 12 °C, foliar de 5 °C y la temperatura letal foliar menor que 1,5 °C.

6. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales y la evaluación térmica del invernadero y sus componentes han demostrado la factibilidad de su integración para lograr un sistema sustentable que permita disponer de una base energética de origen solar obtenida del calor excedente de un invernadero. Se ha desarrollado un invernadero que cumple las funciones de rústico especial satisfaciendo las condiciones agronómicas, disminuyendo los costos energéticos convencionales de calentamiento y evitando que las plantas sufran las consecuencias de las heladas.

La utilización de la energía solar colectada entre las dos cubiertas del invernadero y acumularla en el lecho de piedra, si bien resulta insuficiente para paliar el déficit energético nocturno, ha demostrado que puede suministrar la energía suficiente para asegurar un nivel de temperatura adecuado para días con condiciones climáticas próximas al día típico.

El modelo desarrollado usando la analogía térmica - eléctrica, modelo circuital, permitió en forma sencilla ajustar cada una de las componentes del invernadero y simular el sistema completo con controles de funcionamiento incorporados al programa que produce efectos similares a los planteados para el sistema en condiciones reales.

La predicción del modelo completo para los dos períodos en cuestión han seguido las tendencias de los datos experimentales. Las desviaciones absolutas y relativas de la variable principal de ajuste, dieron valores comparables con los errores de medición. Este grado de correlación con los datos experimentales muestran que los valores de los coeficientes de transferencia térmica utilizados son razonables.

Desde el punto de vista agronómico los resultados han sido muy satisfactorios en razón de haber logrado un 100% de sobrevivencia y una alta tasa de crecimiento.

REFERENCIAS

- Bascetincelik A., Paksoy O. y Ozturk H. (1997). Greenhouse heating with solar energy and phase change energy storage. Acta Horticulturae 443, 63 – 70.

- Chiapale, J. (1981). La serre solaire INRA - CEA: resultates physiques. *Acta Horticulturae* 115.
- Damagnez, J., Chiapale, J. P., Denis, P. y Jourdan, P. (1975) Solargreenhouse: New Process for heating cooling and water economy under greenhouse, ISES Conf., Los Angeles, California.
- Godbey L, Bond T. y Torning H. (1979). Transmission of solar and Long – Wave length Energy by materials used as covers for solar collectors and greenhouses. *Transactions of the ASAE*, pág. 1137 – 1144.
- Grafiadellis, M. (1990). Recent development introduced in the passive solar system for heating greenhouses. *Acta Horticulturae* 263.
- Hartmann H. y Kester D. (1972). Propagación de Plantas. Principios y Prácticas. 2ª. Impresión. Compañía Editorial Continental, S.A.
- Iriarte A. (1989). Informe técnico de Actividades realizadas en la Secretaria de Estado de ciencia y Tecnología de la Provincia de Catamarca.
- Iriarte A. (2001). Acondicionamiento término solar de invernaderos para la producción agrícola intensiva. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta.
- Iriarte A., Bistoni S. y Hoyos D. (1997). Calefacción de invernaderos con sistema mixto sol - gas. *Revista Energías renovables y medio ambiente*, Vol. N° 3, pág. 25 - 31.
- Janjai S., Esper A. y Muhlbauer W. (2000). Modeling the performance of a large area plastic solar collector. *Renewable Energy* 21, pág. 363 - 376.
- Matias C. (1998). Multiplicación de plantas de olivo. Informe técnico de experiencias realizadas en la Provincia de Catamarca. EEA - INTA Catamarca.
- Oliverti G. y Arcuri N. (1995). Prototype experimental plant for the interseasonal storage of solar energy for the winter heating of building: description of plant and its functions. *Solar Energy*, Vol 54, N° 2, pp 85 –97.
- Santomouris M., Mihalakakou G., Balaras C. y Vallindras A. (1995). Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouse. *Solar Energy*, Vol. 55, N° 2, pp. 111 - 124.
- Saravia L. Echazú R., Zunino L., Quiroga M. Y Robredo P. (1988). Sistema solar para uso como invernadero o secadero: nuevo diseño. *Actas 13va. Reunión de ASADES*, pág, 15 – 20, Tomo I.
- Saravia L., Quiroga M., Echazú R. y Cadena C. (1996). Acondicionamiento por vía solar de un sistema de cultivo hidropónico bajo invernadero: diseño y construcción. *Actas 18va. Reunión de ASADES*, pág. 01.29 - 01.32, Tomo I.