



PRODUCCIONES CIENTÍFICAS. Sección: Ciencias de la Ingeniería, Agronomía y Tecnología.

Acondicionamiento Térmico con Energía Solar de un Invernadero Rusticadero para la Producción de Plantas #.

Autores: *Iriarte, A.; Saravia, L. y Matias, C..*

Dirección: iriarte@plab.unca.edu.ar

INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca. M. Quiroga 93. (4700) Catamarca, Argentina.

Introducción:

El desarrollo de un vegetal está determinado no solo por sus caracteres genéticos, que constituyen un potencial embrionario reservado, sino por la acción del medio sobre él, quien definirá finalmente las posibilidades de realización de ese potencial. No basta disponer de una buena planta de magníficas características, hay además que contar con un medio ecológico apropiado para que pueda desarrollarse y mostrar sus condiciones productivas. Los factores del ambiente que rigen la actividad de la planta, tales como: luz, temperatura, humedad ambiente y edáfica, anhídrido carbónico, radiación solar, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, etc., pueden en unas ocasiones ser favorable, lo que permitirá que el vegetal manifieste el potencial productivo que sus caracteres genéticos le fijan. Otras veces el ambiente puede ser desfavorable, lo que redundará en un desarrollo inapropiado y en una baja productividad, que son independiente de las buenas cualidades que el vegetal pueda poseer, pero que el ambiente no le permitió manifestar. Cada uno de estos factores ejerce su influencia propia, la respuesta definitiva del vegetal depende de cada uno de ellos y de las interacciones que los mismos tienen entre sí.

Los factores del clima se consideran invariables y permanentes para un lugar dado. Sin embargo, estos factores pueden modificarse mediante la incorporación de sistemas especiales que regulen las condiciones del clima. Uno de los sistemas

Parcialmente financiado: UNCa, ANCYP, INTA

que producen estos efectos son los invernaderos. El control de un invernadero se basa fundamentalmente en dos parámetros: temperatura y humedad relativa del aire. Todas las plantas tienen límites bien definidos de temperaturas máximas y mínimas, y exigencias concretas en lo que se refiere a humedad relativa del aire para su mejor desenvolvimiento.

Por otro lado, 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 invernaderos utilizando 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. 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 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 la sobrevivencia (45 %), 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.

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 higratérmico, 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 productivo. 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 cría (cámara de vegetación), mediante la utilización de un invernadero de plástico (invernadero rusticadero) acondicionado térmicamente con energía solar combinada con otras formas de energía.

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 filtra 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 transparentes y negras con agua (Iriarte *et al.*, 1989) y tubos de calefacción de suelo, “acolchado radiante” con mangas plásticas flexibles (PVC), dispuestos en la superficie del suelo entre las líneas de cultivo (Grafadellis, 1990) son algunas alternativas para coleccionar-acumular calor dentro del invernadero y aumentar la inercia térmica. 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. Iriarte *et al.* (1997) estudiaron la calefacción de un invernadero con cubierta de vidrio mediante 20 m^2 de colectores-intercambiadores de plástico (bolsas) colocadas en la parte superior del invernadero, con aporte auxiliar a gas envasado.

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 se describe el sistema utilizado, el modelo teórico basado en la analogía eléctrica-térmica, la demanda de energía para la calefacción, la caracterización experimental del invernadero y los resultados obtenidos de la simulación numérica del modelo en comparación con los datos experimentales.

Demanda de Energía:

La situación geográfica del emplazamiento del invernadero (latitud, altitud y orientación) y el tipo de planta a rusticar son, entre otros, algunos de los factores que definen las necesidades energéticas para mantener un microclima adecuado en el interior del invernadero. Por lo tanto, de todas las componentes del clima, la temperatura quizás sea la más influyente en el desarrollo de la planta, aunque sea de forma aparente.

En un invernadero sin ningún sistema de calefacción es posible que la temperatura de las plantas no alcance la necesaria para lograr un desarrollo armónico y compatible con los objetivos de producción que se planificaron. En general, será necesario incorporar calor proveniente de una fuente externa, además del obtenido por la radiación solar, a fin de evitar la mínima letal y conseguir una temperatura aceptable

para las plantas. Este aporte importante de energía, se constituye en el principal gasto de operación que debe realizar el productor que cultiva en invernaderos. Debido al alto costo de los combustibles convencionales la operación de mantenimiento de la temperatura dentro del invernadero se convierte en la limitante de este tipo de actividad. La valoración de los términos del balance energético nocturno permite en primera aproximación establecer la cantidad de energía necesaria para mantener en el ambiente interior un determinado régimen térmico, capaz de lograr un desarrollo adecuado de las plantas.

Nueva Tecnología Viverística para la Producción de Plantas:

Teniendo en cuenta la necesidad de superar los inconvenientes que se presentan con las técnicas de multiplicación por injerto sobre planta de semilla y por estaca en nebulización tradicional (dos fases), se ha desarrollado en el INTA - Catamarca un nuevo método que involucra tanto a la propagación como al desarrollo posterior del barbado, obteniéndose una sensible simplificación de todo el ciclo productivo con evidente repercusión sobre los costos de gestión de la producción y sobre la reducción de los tiempos necesarios para obtener los plantines. Debe destacarse especialmente la velocidad con la cual, a través de estas tecnologías, se cumple el ciclo entero de producción pasando de los 4 a 5 años (técnica de propagación por injerto) a un periodo entre 12 a 18 meses. El ciclo completo de producción de los plantines siguiendo esta técnica de multiplicación en cámara y cría en maceta, se realizó en tres fases: 1) Fase de radicación; 2) Fase de rusticación; 3) Fase de cría.

Fase de radicación:

La fase de radicación consiste en la separación de una parte de la planta (estaca) y la colocación de la misma en condiciones favorables para que se induzca la formación de raíces y tallo. Esta técnica tiene la ventaja de que el tiempo de producción, los costos de mano de obra e insumos son sensiblemente menores frente a los sistemas tradicionales. La desventaja está radicada en la necesidad de realizar infraestructuras costosas y el acondicionamiento de las mismas.

Fase de rusticación:

Esta fase constituye la innovación en el sistema de producción y persigue la estabilización de los barbados obtenidos de la casa de vegetación (cámara de cría). Durante este período es necesario favorecer el desarrollo del aparato radical de las estacas. En consecuencia el ambiente debe asegurar niveles de temperatura tales que se evite el estrés, tanto por calor excesivo como por bajas temperaturas. Se trata de

crear condiciones óptimas de mantenimiento de los barbados en el período que normalmente va desde fines del verano hasta fines del invierno y comienzos de la primavera. Las condiciones óptimas en el recinto de rusticación son: a) temperatura ambiente dentro del recinto debe mantenerse entre 18 y 35 °C. Los valores de temperatura mínima no deben ser menores que la mínima biológica de las plantas que se rustican; b) temperatura en la base de las macetas debe ser superior a los 12 °C; c) humedad relativa del ambiente debe mantenerse entre 50 y 60 %; d) nivel de iluminación debe ser alto para estimular al máximo la fotosíntesis.

Para lograr el ambiente adecuado en esta fase de rusticación se propone la utilización de un invernadero provisto de plataformas o canteros sobre las cuales se colocan los barbados en vasito, (figura 1). Estos canteros disponen de un circuito hidráulico que permite hacer circular agua caliente para mantener la base de las macetas por encima de 12 °C, con un sistema de emergencia para mantener temperaturas superiores a 2 °C. Durante el verano y el otoño, hay que sombreadarlo para evitar excesos de calor. Los barbados durante esta fase, que normalmente dura de *marzo a septiembre*, deben recibir periódicamente riegos limitados, sobretodo en el período invernal.



Figura 1. Vista del interior del rusticadero

Fase de cría:

Es la fase en la cual se completa el ciclo de desarrollo en el vivero. La misma debe permitir a los barbados un crecimiento adecuado en altura (al menos 0,80 m) en el curso de la estación vegetativa (*septiembre a marzo*), y un desarrollo abundante de hojas y raíces para superar el transplante a campo. La fase de cría se efectúa en macetas bajo media sombra (figura 2).

Descripción de las Instalaciones Construidas:

El sistema construido en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA - Catamarca esta formado por: a) invernadero doble cubierta; b) colectores solares interiores; c) acumulador de agua caliente; d) canteros calefaccionados; e) caloducto; f) acumulador de calor en lecho de piedra; g) calentadores auxiliares de agua y aire.



Figura 2. Vista de las macetas en el interior del umbráculo

Invernadero rusticadero

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. La estructura de cada macrotúnel está formada por arcos semicirculares, columnas y piezas longitudinales, todo de caño estructural de acero. Los arcos están formados por dos tubos de 1" de diámetro, separados 0,20 cm. El desarrollo de cada arco es de 8 m para un mejor aprovechamiento del ancho del recubrimiento que se provee en rollos de 9 m de ancho. Estos arcos dobles están montados sobre columnas de tubos estructurales de 1^{3/4}" y 2,5 m de altura. Un macrotúnel completo tiene 12 arcos, cada uno de ellos con dos columnas, distanciadas 2 m entre ellas y unida en su parte media y superior con tubos estructurales de 1^{3/4}" conformando un túnel. Esta estructura está ensamblada con bulones, totalmente desmontable y de fácil traslado, figura 3. Con esta disposición se logra el armado de la estructura en el campo en forma muy rápida y con mano de obra

no especializada.

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 a las longitudes de onda entre 700 y 1400 nm, con una transmitancia global de 0,88 y un espectro de transmitancia con mínimos entre 0,0294 a 302 nm y máximo entre 0,912 a 788 nm. La absorción de radiación ultravioleta (baja transmitancia), característica de este plástico, se debe al aditivo agregado para prolongar su vida útil. Este material se llama en el mercado polietileno de largo duración térmico (L. D. T.).

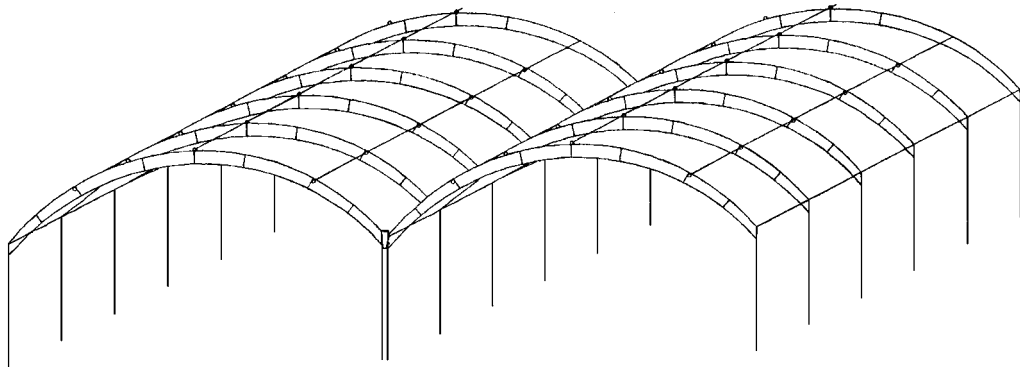


Figura 3. Vista de la estructura del Invernadero

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, de manera que el agua que se condensa en la cara interior de la cubierta exterior cae sobre el mismo y se evacua fácilmente por la canaleta central que une los dos módulos. En los frontales (Este y Oeste), a 0,50 m de la cobertura exterior del invernadero por la parte interior, se ha incorporado una pared de plástico desde el suelo hasta la segunda cubierta. Del lado interno de las paredes laterales (Norte y Sur) están instalados los colectores solares de plástico, constituyendo en ambos casos una doble pared con la cobertura del invernadero. Por debajo del techo, se colocó una cortina aluminizada corrediza, tipo media sombra, que permite pasar el 40 % de la radiación solar incidente. Está montada sobre alambres tensados por debajo de la segunda cubierta (cubierta interior) y posee un sistema que permite su desplazamiento en forma manual. Su finalidad, durante las horas de sol, es disminuir el ingreso de radiación evitando el sobrecalentamiento de la cámara de rusticación, especialmente en primavera y verano; y disminuir las pérdidas por radiación infrarroja por las noches.

De esta manera se ha establecido una cámara de rusticación dentro del invernadero, constituida por las paredes frontales internas, los colectores solares y la segunda cubierta. Esta cámara de 2 m de altura, 14,5 m de ancho y 20 m de largo permite: a) controlar adecuadamente los niveles de humedad requeridos; b) disminuir

el volumen de aire a calentar-enfriar y las pérdidas por convección-conducción a través de la cobertura exterior; c) coleccionar por medio de los colectores de plástico transparentes y negros ubicados en el Norte la radiación infrarroja y parte del visible, sin producir sombras en exceso sobre los plantines; d) coleccionar la radiación que incide sobre la pared Sur por medio de los colectores negros, interceptando la radiación que se perdería a través de dicha pared; e) evitar el goteo de agua sobre las plantas por la condensación sobre la parte interior de la cubierta exterior del invernadero.

Acondicionamiento térmico solar

El acondicionamiento térmico solar 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. La radiación incidente se capta mediante colectores solares de agua de bajo costo y se extrae de la parte superior del invernadero el excedente de calor, almacenándolos en acumuladores de agua y aire respectivamente. El agua caliente se usa para calentar los canteros que contienen las bolsas con plantines y el aire para calefaccionar el ambiente del invernadero, cuando las temperaturas descienden de los valores preestablecidos. En la figura 4 se muestra esquemáticamente en corte y en planta el sistema de calefacción del “invernadero rusticadero”.

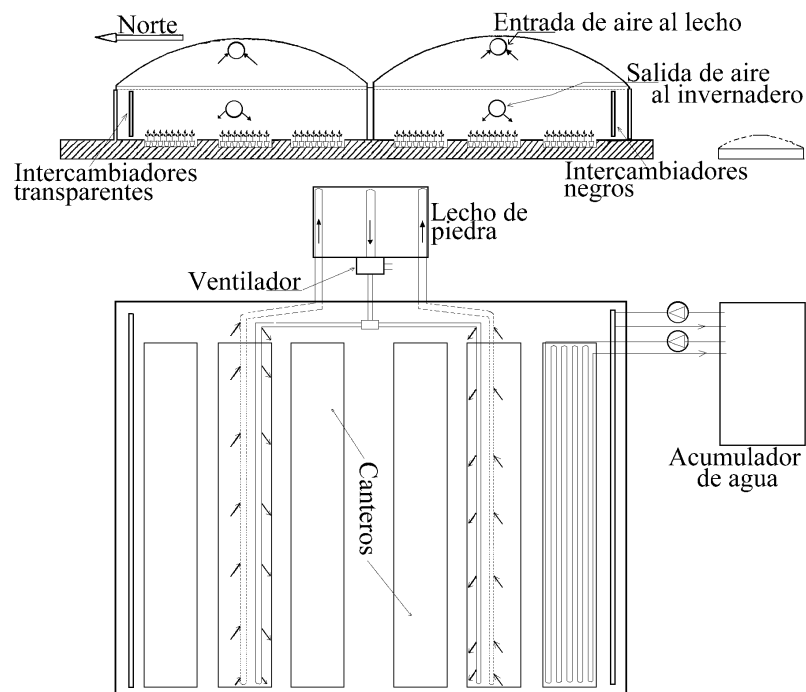


Figura 4. Corte y planta del invernadero rusticadero

Colectores solares y acumulador de agua caliente:

Las placas de los colectores solares están construidos 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 que constituyen la pared Norte de la cámara 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 y el plástico que cierra la cámara como "fondo" del mismo. Este último, restringe la entrada de infrarrojo y aumenta la eficiencia de colección disminuyendo la pérdida de la bolsa hacia el interior del invernadero, figura 5. En la pared lateral Sur de la cámara, paralelo a la pared de plástico del invernadero, se instalaron colectores solares de polietileno negro, figura 6. 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.



Figura 5. *Vista interior de la pared Norte del invernadero. Bolsas colectores solares transparentes y negras.*



Figura 6. Vista interior de la pared Sur del invernadero. Bolsas colectores solares negras.

En ambos casos, lateral Norte y Sur, constituyen una doble pared lateral para el invernadero y paredes laterales para la cámara. Esto permite disminuir las pérdidas del invernadero. 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 los colectores solares para la acumulación del agua caliente se ha construido un reservorio de agua bajo tierra en el exterior del invernadero. Este acumulador de agua caliente consiste en una excavación recubierta con una membrana impermeable. En la base del pozo entre la membrana y la tierra se agregó $0,20 \text{ m}$ de arena, mientras que en los laterales se colocaron planchas de poliestireno expandido de $0,05 \text{ m}$ de espesor como aislante. El reservorio de agua fue recubierto con un plástico negro con el propósito de evitar el ingreso de radiación solar y consecuentemente la proliferación de algas. El volumen útil del acumulador 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, figura 7. La base del cantero esta aislada con perlita (lava volcánica), mientras los costados están recubiertos con ladrillos y revoque reforzado. Arriba de la aislación se han instalado un conjunto de tubos de poliestireno negro ($\varnothing = 0,0125 \text{ m}$) ubicados en paralelo y separados $0,05 \text{ m}$ entre si. Por el interior de los tubos circula agua caliente que intercambia calor con la base de las macetas que contienen las plantas.



Figura 7. Vista de los canteros calefaccionados. Plantines en macetas

Cada cantero dispone de un sistema de humectación y riego ubicado a 0,60 m arriba del mismo, compuesto de aspersores auto compensados con válvulas antigoteo que permiten crear una niebla artificial con intervalos controlados. Esta nebulización mantiene un nivel de humedad adecuada y aporta agua a las plantas. De seis canteros existentes solo se han calefaccionado los tres destinados a estacas recién enraizadas.

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 x 0,15 m, pintada de negro. Dispone de rendijas (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 m de diámetro. Esta formado por dos cuerpos de 6,75 m³ cada uno, con dos conductos laterales (plenos) y uno central por donde ingresa y sale el aire respectivamente, figura 8.



Figura 8. Vista de los dos módulos del lecho de piedra en su etapa de construcción.

Las paredes laterales y techo han sido aislados térmicamente con placas de poliestireno expandido de 0,10 m de espesor y una densidad de 15 kg m^{-3} . Para evitar la pérdida de aire, todo el conjunto fue recubierto con doble tela plásticas de 200 micrones de espesor. El aire caliente que es succionado por un ventilador de la parte superior del invernadero entre las dos cubiertas, atraviesa cada cuerpo del lecho de piedra y es impulsado hacia el interior del invernadero, figura 9. Durante la noche el aire de la cámara en el interior del invernadero es recirculado a través del lecho. El acumulador de piedra esta ubicado en el sector Este, exterior al invernadero.

Sistema de medición y control para el acondicionamiento

Para la medición de los parámetros característicos que permitieron definir el comportamiento del invernadero se usó lo siguiente: 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. Todos los sensores fueron 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 LI - COR 200SA $\pm 3 \%$; d) 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. Dos software desarrollados (Iriarte *et al.*,

1997) permite comandar un circuito lógico con relay que controla los contactores de las bombas y del ventilador.



Figura 9. Vista del acumulador de calor con lecho de piedra. Caloductos entre las dos cubiertas. Conductos de aspiración e impulsión.

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 m de alto, 0,04 m ancho y 0,005 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 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.

Modelo Teórico. Analogía Térmica – Eléctrica:

En base a 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, de donde se puede buscar una analogía eléctrica para cada elemento térmico. A continuación se detalla la definición de cada elemento en el marco de la analogía eléctrica ampliada, que se empleará para realizar los balances térmicos en las distintas componentes del rusticadero:

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

Condensador (C): representa la acumulación térmica sensible. La energía acumulada se calcula respecto a una temperatura de referencia, todos los condensadores se conectan a un mismo nodo de potencial de referencia cero (tierra).

Fuente de tensión (E): 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 $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Fuente de corriente (J): Se pueden distinguir dos tipos:

- ❖ Fuentes de corrientes que representan un flujo de calor o a un flujo de masa que se comportan como fuentes de potencia que generan una corriente entre dos nodos, 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.

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 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 M (JM). También existe el caso especial destinado a medir temperatura de un nodo o entre dos nodos, 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.

Modelo del Invernadero Rusticadero Solar:

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 infiltración (2 renovaciones por 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 de esta última 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 intercambios radiativos corresponden a procesos de transferencia de calor entre dos superficies y entre superficies y la bóveda celeste representada por la temperatura de cielo. En todos los casos de intercambio radiativo no se tuvo en cuenta los factores de forma de las superficies, asumiendo que son iguales a uno. Asimismo, 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 10), 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. Estos capacitores están referidos masa (temperatura de referencia: cero Celsius).

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:

$$q_{cv} = IRV56 + IRV57 \quad (1)$$

- ❖ perdido con conducción:

$$q_{cd} = IRD52 + IC51 \quad (2)$$

- ❖ perdido debido a los intercambios radiativos:

$$q_{rr} = IRR59 + IRR63 + IRR64 \quad (3)$$

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)

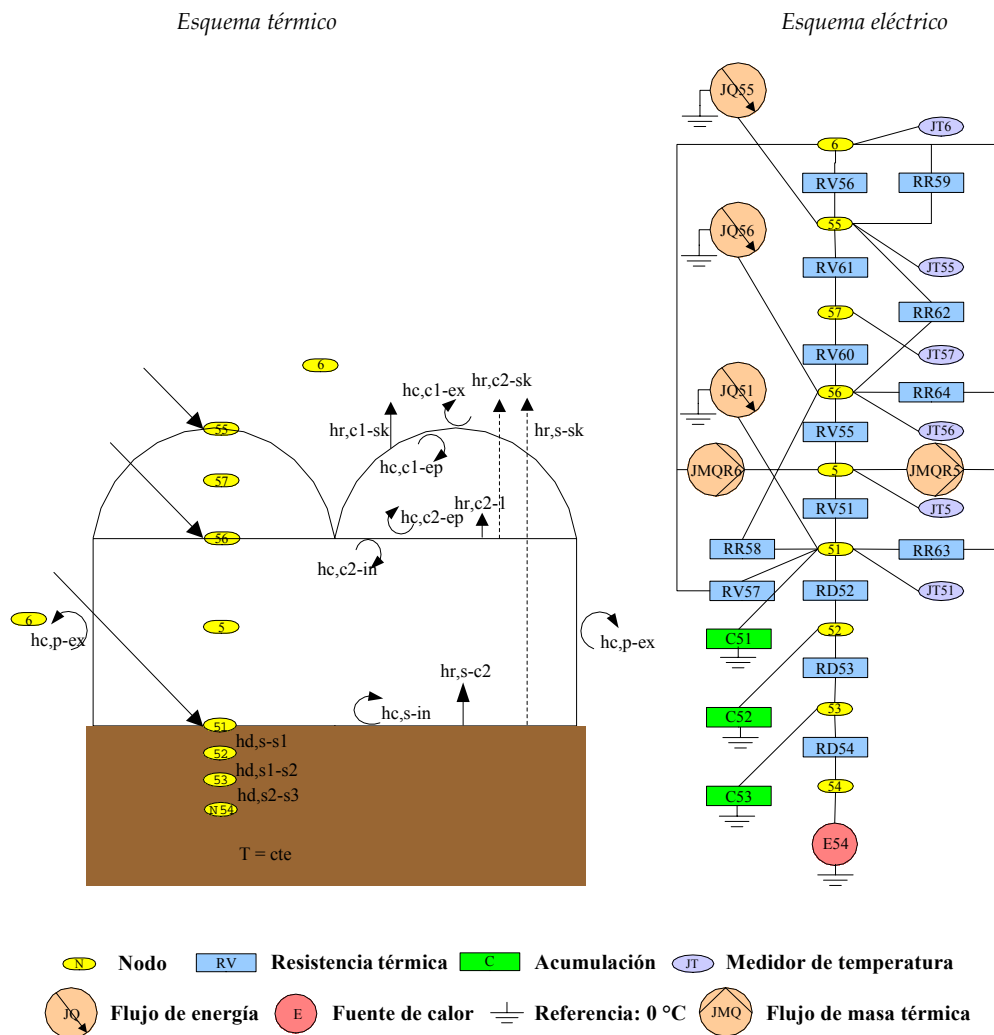


Figura 10. Esquema y circuito del invernadero doble cubierta

De igual forma se construye el modelo correspondiente a los colectores de plástico (norte y sur), acumulador, canteros, caloductos y lecho de piedra.

Resultados y Discusión:

Caracterización experimental del invernadero:

Para evaluar el comportamiento del invernadero-rusticadero se han realizado ensayos bajo diferentes configuraciones y condiciones ambientales:

1. **Invernadero simple en régimen espontáneo o libre:** este invernadero está formado por una estructura, cobertura general simple, sin doble cubierta y con los colectores solares en sus laterales constituyendo una doble pared con cámara de aire. Es un invernadero común sin ningún tipo de aporte de calor adicional.
2. **Invernadero doble cubierta en régimen espontáneo o libre:** al invernadero simple se le adicionó una doble cubierta y frontales dobles, formando con los colectores solares Norte y Sur un recinto interno al invernadero de 2 m de alto, 20 m de largo y 14 m de ancho.
3. **Invernadero doble cubierta con malla media sombra en régimen espontáneo o libre:** al invernadero doble se le adiciona la malla plástica aluminizada corrediza.
4. **Invernadero doble cubierta con malla media sombra con aporte de calor exterior:** se realiza un aporte nocturno de calor proveniente de un lecho de piedra, cargado durante el periodo mediante el aire caliente excedente del invernadero.

En la figura 11 se muestra la variación de la temperatura del ambiente interior y exterior del invernadero durante cuatro días consecutivos para las tres primeras configuraciones. En la misma se advierte que la diferencia de temperatura entre el interior del invernadero ($T_{a,in}$) y el exterior ($T_{a,ex}$) aumenta a medida que se adicionan los elementos descritos en las configuraciones 2 y 3. A las 30,38 horas (6:23 a.m.) del inicio del primer período de análisis, cuando ocurre la mínima temperatura exterior (8,7 °C), la temperatura del ambiente interior esta 2,3 °C por encima de ella. En la noche siguiente, con la incorporación de la doble cubierta de plástico, se obtuvo una diferencia de temperatura de 4 °C a las 56,07 horas (8:40 a.m.), siendo la temperatura mínima exterior de 10,8 °C, a la misma hora.

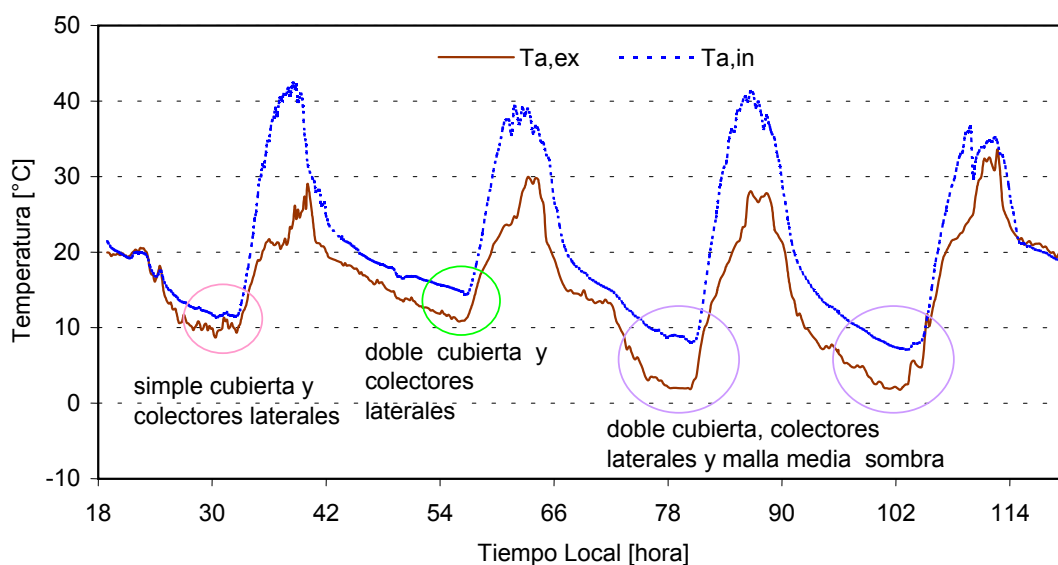


Figura 11. Comportamiento del invernadero para diferentes configuraciones del invernadero

Los días posteriores (3ero. y 4to.) se cubrieron con la malla de media sombra aluminizada, a partir de las 66 horas y 90 horas, que corresponden a la hora local 6 p.m. de cada día. En estas situaciones se obtuvieron diferencias del orden de 6,6 °C y 5,5 °C, siendo las temperaturas mínimas exteriores de 2 °C y 1,8 °C respectivamente. Esto indica que la incorporación de la doble cubierta disminuye la pérdida de calor del invernadero, aumentando la diferencia de temperatura con el exterior en un 48 %, mientras que la incorporación de la malla aluminizada aumenta la diferencia entre un 37,5 % y 65 % según el día, obteniéndose una diferencia respecto al invernadero sin coberturas internas de 103 % al 144 %.

La evolución de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior para el invernadero calefaccionado con el aire proveniente del acumulador en lecho de piedra, con la doble cobertura instalada y la malla extendida a partir de las 6 p.m. durante los cuatro días del ensayo, se observa en la figura 12. La diferencia de temperatura para los cuatro días fueron de 6,1, 10,2, 13,7 y 10 °C, mientras las temperaturas externas mínimas de 7,3, 3,1 , 0,9 y 4,3 °C.

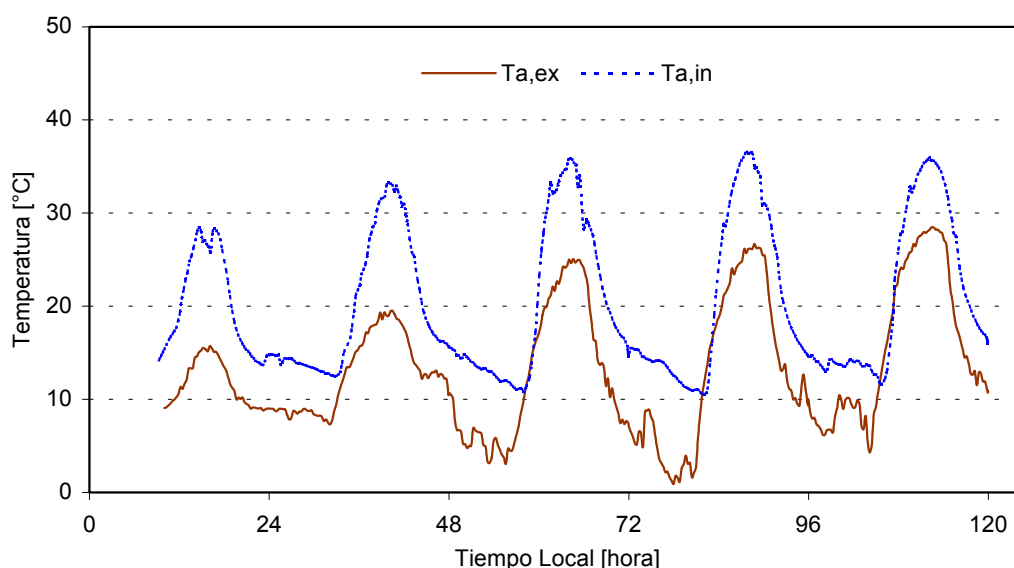


Figura 12. Evolución de la temperatura interior del invernadero para diferentes aportes de calor y temperaturas del ambiente exterior.

La incorporación de la segunda cubierta permite lograr valores de humedad relativa en el ambiente interior del invernadero, comprendidos entre el 50 y 80 % para horarios diurnos, y entre el 80 y 95 % para los nocturnos. Asimismo, los valores de iluminación con la cortina desplegada cubriendo todo el invernadero, estuvieron comprendidos entre 3500 y 4000 lux a las 9:00 a.m. y entre 7500 y 8000 a las 1:00 p.m., para días claros. Estos valores son aceptables para la actividad productiva propuesta.

Asimismo, si consideramos que el invernadero es un colector solar con un flujo másico que circula por él igual a la ventilación e infiltraciones (R), y la temperatura de entrada del aire igual a la temperatura del aire exterior, el calor ganado por el invernadero es:

$$q_u = A_c F_R I_{h,ex} (\tau\alpha) = R C_{p,a} (T_{a,in} - T_{a,ex}) \quad (7)$$

despejando la diferencia de temperatura entre la salida ($T_{a,in}$) y entrada de aire ($T_{a,ex}$) se obtiene:

$$T_{a,in} - T_{a,ex} = \alpha_1 I_{h,ex} ; \quad \text{donde: } \alpha_1 = \frac{A_c F_R (\tau\alpha)}{R C_{p,a}} \quad (8)$$

La correlación lineal entre los datos experimentales de la temperatura del invernadero y la radiación solar incidente sobre superficie horizontal ($I_{h,ex}$), permite

determinar α_1 . En la figura 13 se muestran los valores experimentales de esta correlación. El mejor ajuste corresponde a la siguiente ecuación:

$$T_{a,in} - T_{a,ex} = 0,0152 I_{h,ex} + 4,07 \quad (9)$$

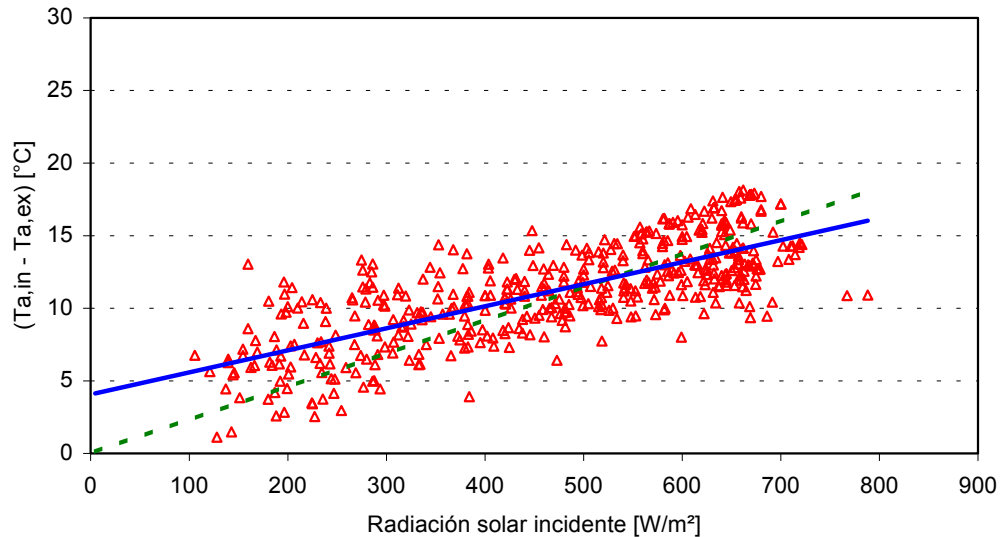


Figura 13. *Correlación entre la temperatura del invernadero rusticadero y la radiación incidente sobre superficie horizontal*

La ordenada en el origen de 4,07 °C está indicando la inercia térmica del invernadero debido a la acumulación de calor en el suelo. La regresión que pasa por el origen es la que corresponde al invernadero-colector solar sin acumulación en el suelo y su ecuación es:

$$T_{a,in} - T_{a,ex} = 0,0229I \quad (10)$$

Para evaluar el comportamiento del invernadero rusticadero se han seleccionado, de dos meses de funcionamiento continuo en el período invernal, los días más favorables para mostrar la contribución de cada uno de los elementos que aportan energía y conforman el sistema de aprovechamiento solar asociado. En este sentido se ha considerado un período con todas las componentes y otro sin los intercambiadores de los canteros funcionando. La tabla 1, muestra la distribución vertical de temperatura desde el ambiente exterior hasta 0,50 m por debajo del nivel del suelo, pasando por el ambiente interior, hojas y raíces de los plantines. En la misma se han tomado dos días, uno dentro de las previsiones del diseño y el otro totalmente atípico muy alejado de las condiciones establecidas para el día típico. En el perfil de temperaturas se detalla: a) medio día solar (MDS); b) hora de ocurrencia de la

temperatura ambiente exterior máxima (MAX); c) media noche, 23:59 hora local (MN); d) hora de ocurrencia de la temperatura ambiente exterior mínima (MIN).

<i>Temperatura</i>	<i>dentro condición de diseño</i>				<i>fuera condición de diseño</i>			
	MDS	MAX	MN	MIN	MDS	MAX	MN	MIN
<i>Hora</i>	13:25	16:25	23:59	07:50	13:30	15:21	23:59	08:32
Ta,ex	18,8	21,1	6,4	2,3	10,6	13,1	0,5	-5,3
Tp,c-N	40,8	39,9	7,9	6,1	37,38	38,3	3,7	-1,2
Tp,c-S	37,4	38,2	8,7	6,6	31,7	32,0	4,8	0,1
Ta,c1-c2	35,7	36,9	8,9	5,9	30,1	30,8	3,8	0,0
Ta,in	31,49	30,8	12,6	10,2	24,9	27,4	8,7	3,7
Th	28,3	29,7	13,2	10,9	25,3	27,9	6,7	1,5
Tr	18,7	22,0	18,6	16,3	12,7	14,9	14,7	12,2
Tb,m	21,9	23,3	17,6	16,2	18,4	19,6	13,1	12,4
Tw,ac1	33,0	31,8	18,9	15,8	23,5	25,5	10,9	7,9
Tw,ac2	27,8	29,7	25,9	23,4	18,1	20,7	17,3	14,5
Tw,ac3	26,5	28,4	26,1	23,6	16,8	18,1	17,4	14,6
Ts1	23,1	23,4	16,9	14,3	17,9	20,6	12,6	7,6
Ts2	17,9	17,7	17,9	18,9	15,5	15,3	15,4	15,5

Tabla 1. *Distribución vertical de temperatura para diferentes horas de dos días de ensayo, uno dentro y el otro fuera de las condiciones de diseño.*

En el día que las condiciones climáticas están próximas al día típico (dentro de las condiciones de diseño) para una temperatura ambiente exterior mínima de 2,3 °C y máxima de 21,1 °C, se advierte que la temperatura de las raíces durante el día no ha bajado de los 16 °C. Asimismo, la temperatura del ambiente interior al invernadero esta dentro de los límites establecidos como valores de la temperatura mínima biológica. Haciendo el mismo análisis para condiciones externas más extremas (-5,3 °C), fuera de las condiciones de diseño, la temperatura del sustrato debajo de la raíces de los plantones no bajó del límite biológico establecido, sin embargo la temperatura de las hojas fue de 1,5 °C, menor en 3,5 °C de la temperatura mínima letal. La temperatura del aire en el interior del invernadero fue de 3,7 °C.

Para evaluar el funcionamiento de los colectores solares se ha seleccionado un día claro con una radiación máxima sobre superficie vertical de 800 W m⁻² al medio día solar (13:30 hora local), con un aporte diario de energía solar de 714 MJ, una temperatura ambiente exterior mínima de 3,8 °C y máxima de 25,8 °C. Los colectores del sector norte iniciaron su funcionamiento continuo a partir de las 10:16

horas con un caudal de circulación de agua $0,40 \text{ kg s}^{-1}$ (1.440 kg h^{-1}) durante 7,68 horas, obteniendo una energía total diaria de 192 MJ y una eficiencia global diaria de 26,9 %, mientras que los del sector sur (negros únicamente) iniciaron su funcionamiento continuo a partir de las 11:39 horas con un caudal de circulación de agua de $0,46 \text{ kg s}^{-1}$ (1.656 kg s^{-1}) durante 5,85 horas, obteniéndose una energía total diaria de 65 MJ y una eficiencia global diaria de 9,1 %.

La diferencia de funcionamiento entre ambos colectores se muestra en la figura 14, donde se representa la variación de temperatura de entrada ($T_{w,e}$) y salida de agua de los colectores Norte ($T_{w,sN}$) y Sur ($T_{w,sS}$) y las eficiencias instantáneas de cada uno ($efiN$ y $efiS$) en función del tiempo, destacándose que la máxima eficiencia de los colectores Norte fue 36,7 %, mientras que los colectores del Sur alcanzaron un 18,7 %. La diferencia de eficiencia promedio diaria entre ambos grupos de colectores fue del 18 %.

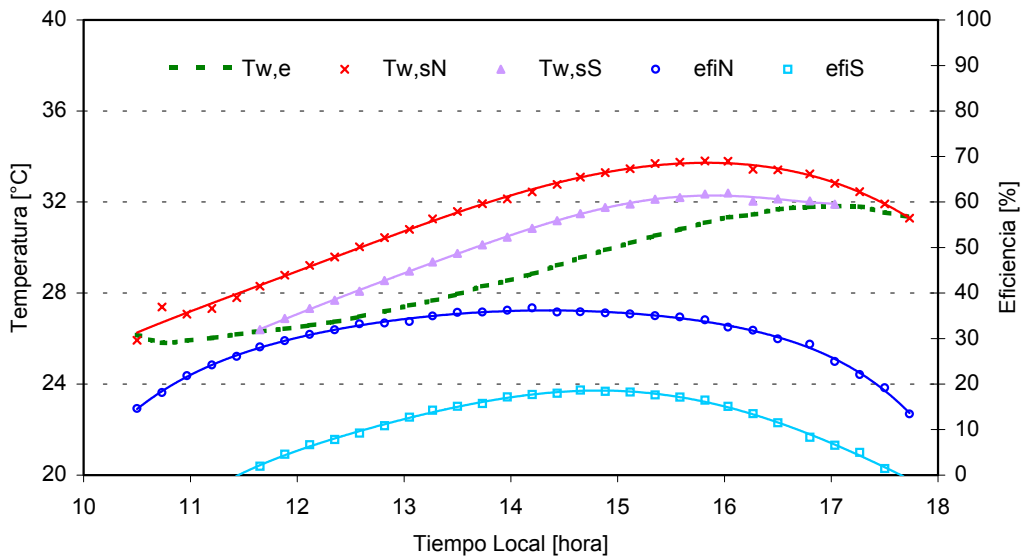


Figura 14. Variación de temperaturas y eficiencias instantáneas de los colectores Norte y Sur interiores al invernadero

El depósito de acumulación a través del cual se recircula el agua caliente, dispone al inicio del día (10 horas) de 541 MJ, los colectores solares entregan durante el día 257 MJ y al finalizar el mismo el acumulador dispone de 766 MJ, lo que implica una pérdida de energía durante la carga del acumulador de 32 MJ (12,5 %). Durante la noche el acumulador entrega calor a los canteros y pierde calor por sus laterales 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 reservorio de agua tiene al día siguiente a las 10 horas 550 MJ. El coeficiente global de pérdida promedio del acumulador durante el periodo nocturno fue de $9,2 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$, calculado con datos experimentales de varios días sin extracción de calor.

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 en la base de las macetas fue menor que 16 °C, límite a partir del cual se inicia el funcionamiento del sistema de calentamiento de canteros. El coeficiente global promedio de transferencia de calor del sistema de calentamiento fue de 2,5 W m⁻² °C⁻¹ para un flujo másico de 0,24 kg s⁻¹ (864 kg s⁻¹) de agua circulando por cantero. En la figura 15 se muestra las variaciones de las temperaturas bajo de una maceta (Tb,m), del agua a la entrada del cantero (Tw,eCa) y del suelo sin calefaccionar (Ts,sc), en comparación con la temperatura del ambiente exterior al invernadero.

Se advierte que a pesar de que la temperatura 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. Esto se advierte más claramente en la tabla 1. Por otro lado, en la misma figura, se puede notar el momento de inicio (01:14 horas) y parada de la bomba (09:53 horas), responsable de la circulación del agua por los canteros. Después de las 10 horas se detiene y reinicia su funcionamiento al día siguiente a las 02:00 hasta las 09:55 horas del mismo.

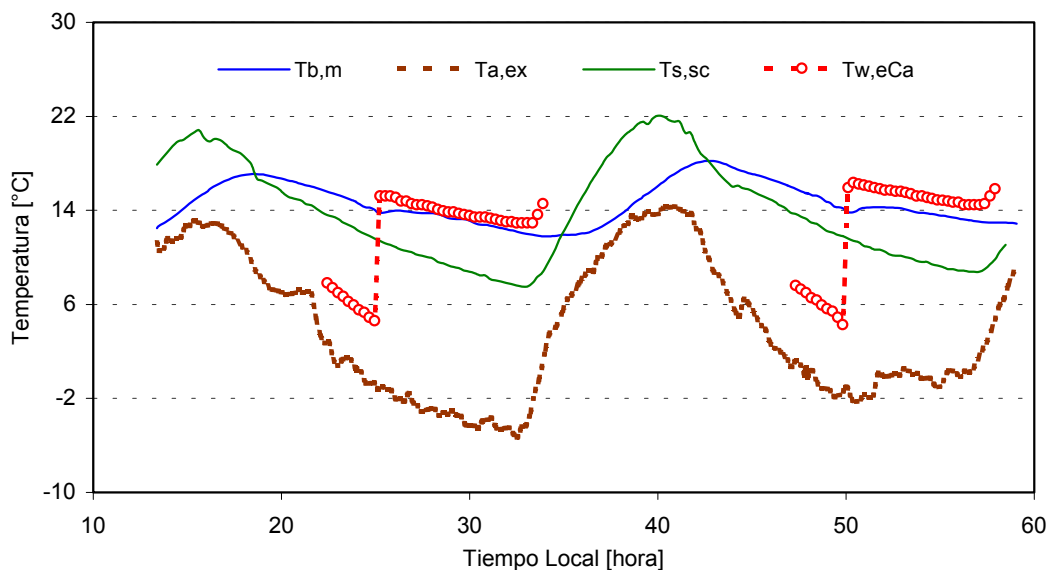


Figura 15. Variación de las temperaturas en los canteros con y sin calentamiento y del ambiente exterior al invernadero en función del tiempo.

El comportamiento térmico del acumulador de aire caliente se puede observar en la figura 16. Como se puede ver el valor de temperatura mínima del ambiente exterior al invernadero fue de 2,8 °C, sin embargo la temperatura del aire interior al invernadero se mantuvo por encima de los 7 °C, valor fijado como límite mínimo. En la misma figura se puede observar la variación de la temperatura del aire en el acumulador en lecho de piedra mientras se produce la carga (10:03 hasta las

17:30 horas) y descarga (03:40 hasta 09:45 horas), así como los valores que alcanza la temperatura del aire a la entrada del lecho ($T_{a,eL}$) proveniente del caloducto (máxima 41 °C), ubicado en la parte superior del invernadero entre las dos cubiertas. La descarga nocturna provee de aire caliente ($T_{a,sL}$) con temperaturas comprendidas entre 20,6 y 15,6 °C.

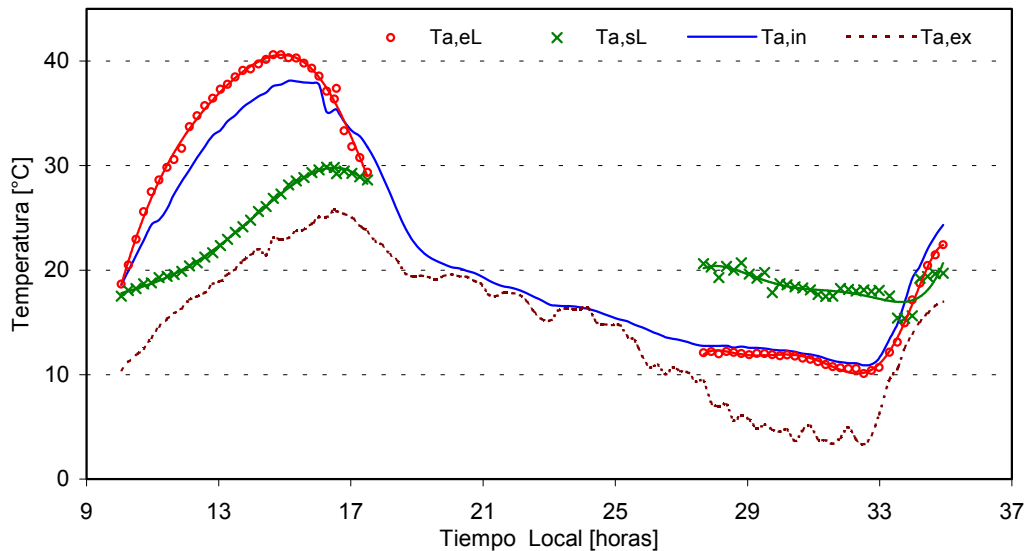


Figura 16. Variación de las temperaturas del aire a la entrada y salida del acumulador de piedra y de las temperaturas del ambiente interior y exterior al invernadero.

Haciendo un balance de energía sobre el acumulador se obtuvo que: a) la energía cargada durante el día en lecho de piedra fue de 61 MJ; b) la extraída durante la noche fue de 34,5 MJ; c) el exceso de carga en el ciclo completo fue de 26,5 MJ disponibles para el día siguiente. La efectividad promedio del caloducto durante las horas de carga fue del 36 %.

En la figura 17 se muestran dos períodos de tres días cada uno donde se puede observar la variación de la temperatura del aire interior del invernadero, la temperatura de las bases de las macetas que tienen los plantines dentro de los canteros y del acumulador de agua ($T_{w,ac}$) en comparación con la temperatura del ambiente exterior. 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). Los tres primeros días seleccionados tienen valores de temperatura mínima muy por debajo de la temperatura de diseño, mientras en el otro grupo de días las temperaturas son próximas al día típico. En este último grupo no se ha graficado la temperatura del acumulador de agua porque no se ha utilizado el sistema de calentamiento de los canteros al tener en la base de las macetas (cerca de las raíces) temperaturas

superiores a 16 °C, debido al aporte de energía solar durante el día y al calentamiento del aire proveniente del lecho de piedra durante la noche. Se advierte que la escala de tiempo en la gráfica entre el final de una serie de datos y el comienzo de la otra no es real; sin embargo se ha respetado el tiempo transcurrido dentro del grupo de días seleccionados.

En la primera serie de datos se puede observar 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, situación que no se advierte en el segundo grupo como era de esperar. También este tipo de cambio se observa en la curva correspondiente a la temperatura del aire interior al invernadero correspondiéndose con el inicio del funcionamiento del acumulador de piedra. Esta modificación también ocurre en el segundo grupo de días, 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.

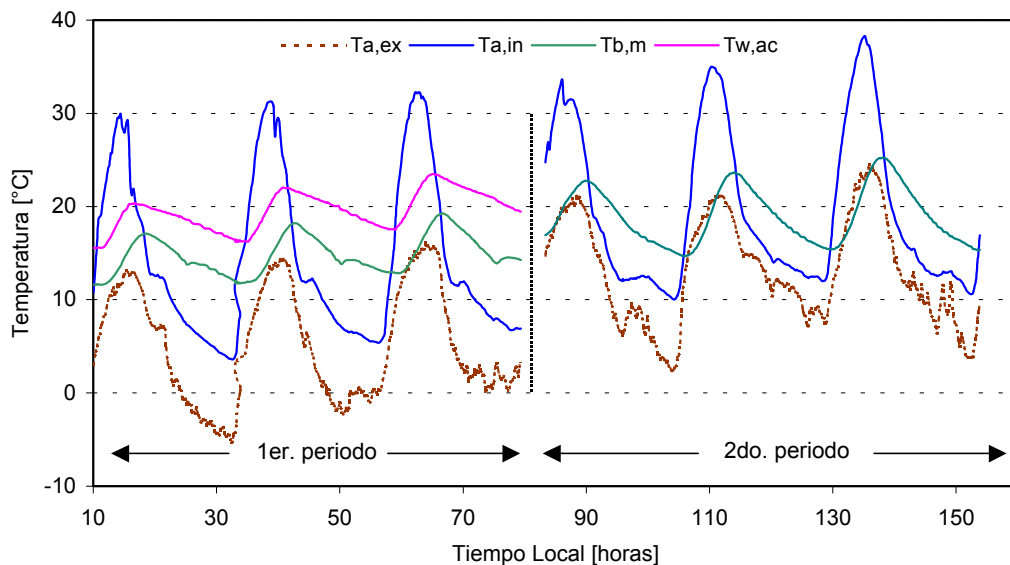


Figura 17. Temperaturas interiores y exteriores al invernadero rusticadero en función del tiempo para dos grupos de tres días con características ambientales diferenciadas, dentro y fuera de las condiciones de diseño

De esta forma las condiciones ambientales mínimas que soportaron los plántones fueron: temperaturas radicular de 12 °C, foliar de 1,5 °C. Estos datos experimentales permiten fijar, en primera instancia como límite confiable para los

plantines recién enraizados, temperaturas próximas a esos valores. Por lo tanto la temperatura mínima biológica radicular para los plantines de olivo es de 12 °C , la foliar de 5 °C y la temperatura letal foliar menor que 1,5 °C.

Simulación numérica

El análisis numérico del modelo análogo eléctrico-térmico se realizó mediante el programa SCEPTRE escrito en lenguaje FORTRAN que permite analizar circuitos eléctricos utilizando el método de variables de estado, determinando las condiciones iniciales, la transitoria y la respuesta continua de las redes eléctricas y de los sistemas dinámicos.

Para realizar el ajuste del modelo a los resultados experimentales obtenidos en los ensayos, se tuvo en cuenta que las condiciones de funcionamiento de una determinada componente del sistema solar está ligada al resto del mismo y depende de los aportes o reducción de calor de las otras componentes. En este sentido, con el propósito de mantener las contribuciones térmicas de todas las componentes se ha realizado el ajuste de cada una de ellas, caracterizando el comportamiento de las otras mediante tablas con los datos experimentales y las condiciones que controlaban su funcionamiento. Los ajustes se realizaron con los flujos principales que participan en el proceso de transferencia de calor, interpretando físicamente los resultados en cada caso y teniendo en cuenta que estos ajustes están absorbiendo otros errores de cálculo de menor envergadura. Así, para el ajuste de la temperatura del ambiente interior al invernadero se incorporaron en los nodos correspondientes (figura 10), todas las componentes que integran el invernadero rusticadero 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 e intercambiadores de calor de los canteros. Estos últimos aportan calor a las macetas y al nodo 52 (figura 10).

Los ensayos que se utilizaron para el ajuste y verificación de los resultados correspondieron a los dos períodos de tres días consecutivos, caracterizados por los niveles de temperatura mínima diaria, usados para describir lo ocurrido en el invernadero con y sin canteros calefaccionados. En la tabla 2 se muestran algunos resultados promedios para cuatro días del ajuste en términos de la desviación entre los valores experimentales y los simulados y del error relativo (E_r) respecto al valor experimental del ajuste. Con respecto al invernadero, el factor de absorción de la radiación incidente sobre las dos cubiertas fue la variable principal de ajuste, obteniéndose un valor de 0,36 sobre el piso.

Componentes	Variable de ajuste	Desviación	Er [%]
Colector norte	Temperatura de agua a la salida	0,22 °C	0,7
	Máxima eficiencia Instantánea	0,006 °C	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

Tabla 2. Variables y error relativo del ajuste en cada una de las componentes

En la figura 18 se muestra la radiación solar incidente sobre superficie horizontal a nivel de piso ($R_{h,in}(E)$) medida por un piranómetro y la obtenida por el modelo ($R_{h,in}(S)$). El valor absoluto de la desviación promedio entre la radiación experimental y la del modelo para cuatro días, dos de cada periodo seleccionado, fue de 11 W m^{-2} con un error relativo respecto del valor experimental del 10 %. En la misma figura se comparan las temperaturas del ambiente interior del invernadero obtenida experimentalmente ($T_{a,in}(E)$) y simulada ($T_{a,in}(S)$).

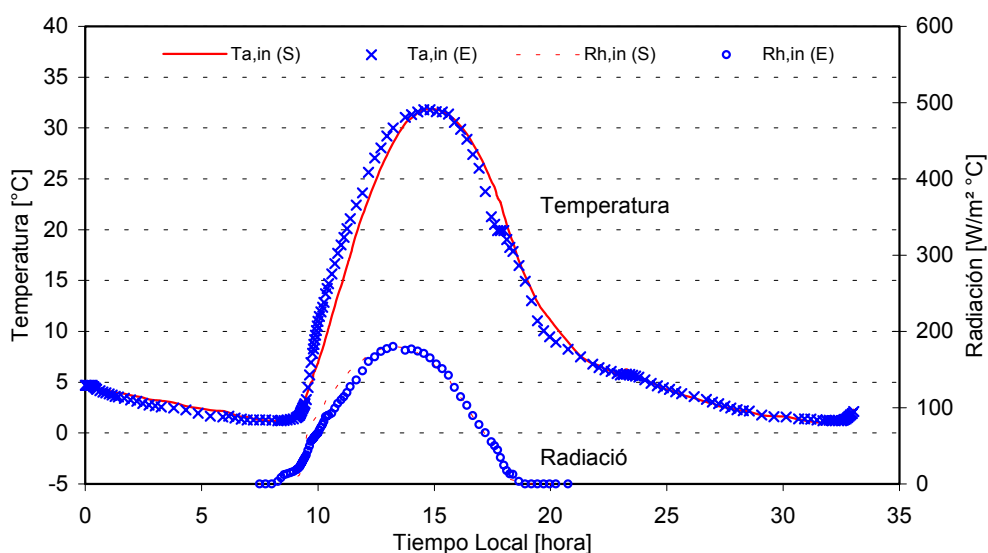


Figura 18. Ajuste de la radiación global incidente sobre superficie horizontal (suelo) y de la temperatura en el interior del invernadero.

En la tabla 3 se especificaron 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 de 754,9 MJ. En este caso el tiempo de calefacción es de 13,8 horas.

	Ta,in = 12 °C		Ta,in = 15 °C	
	H [kW]	D [MJ]	H [kW]	D [MJ]
<i>total IRV</i>	2,4	133,2	3,1	161,6
<i>total IRR</i>	13,3	680,4	15,6	802,1
<i>total IRD</i>	-8,3	-361,4	-6,3	-304,2
<i>total JMQ</i>	5,5	300,2	7,4	378
<i>Total neto</i>	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	

Tabla 3. Pérdidas promedio y demanda de energía nocturna

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

En la primera de ellas, sin canteros (figura 19) y con canteros (figura 20) se muestran los valores de las temperaturas promedio del acumulador ($T_{w,acun}(S)$), salida del aire del lecho ($T_{a,sL}(S)$), base de la maceta ($T_{b,m}(S)$), ambiente interior, en contraste con las temperaturas del ambiente exterior al invernadero, según corresponda.

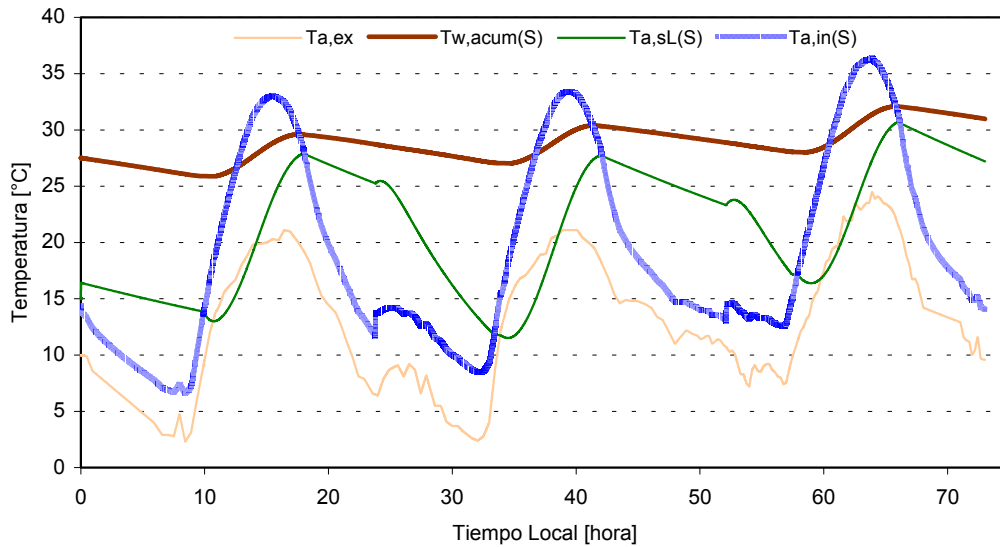


Figura 19. *Temperaturas simuladas de las componentes del invernadero rusticator solar sin canteros*

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 rusticator especial satisfaciendo las condiciones agronómicas, disminuyendo los costos energéticos convencionales de calentamiento y evitando que las plantas sufran las consecuencias de las heladas.

La combinación colectores solares y acumulador de agua caliente asociado al sistema de calentamiento de canteros ha permitido no solo calentar la base de las macetas (raíces), sino también contribuir en las horas de mayor necesidad al calentamiento del aire en el interior del invernadero.

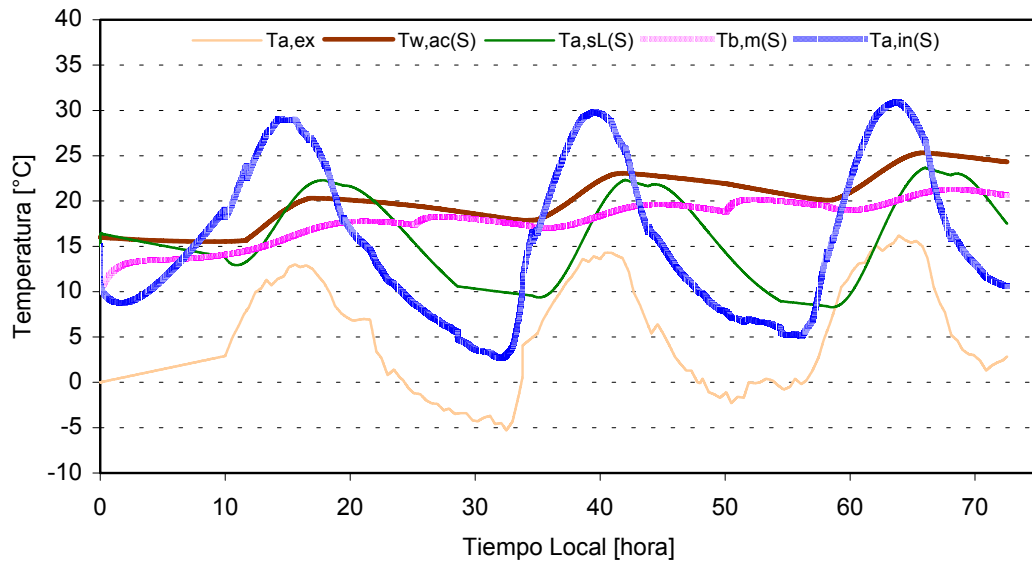


Figura 20. Temperaturas simuladas de las componentes del invernadero rusticadero solar con canteros

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 haberse logrado un 100 % de sobrevivencia, una alta tasa de crecimiento y un material de excelente calidad.

Nomenclatura:

- A_{c1} : área de la cubierta 1 [m^2]
 A_{c2} : área de la cubierta 2 [m^2]
 A_c : superficie cubierta del invernadero [m^2]
 $C_{p,a}$: calor específico del aire a presión constante [$kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$].
 F_R : factor de remoción del calor
 α_{c1} : absorbanza de la cubierta 1
 α_{c2} : absorbanza de la cubierta 2
 α_s : absorbanza del suelo
 τ_{c1} : transmitancia de la cubierta 1
 τ_{c2} : transmitancia de la cubierta 2
 $(\tau\alpha)$: factor absorbanza-transmitancia

Referencias Bibliográficas:

- 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.
- 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., 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.
- Matias C. (1998). Multiplicación de plantas de olivo. Informe técnico de experiencias realizadas en la Provincia de Catamarca. EEA-INTA Catamarca.
- 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.

Bibliografía:

- Alpi A. (1991). Cultivo en invernadero, Ed. Mundi Prensa.
- ASHRAE Standard 93-77. Methods of testing to determinate the thermal performance of solar collectors. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1977.
- Barranco D, Fernández Escobar, R. y Rallo, L. (1998). El Cultivo del Olivo. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 2º Edición.
- Becker D. (1973). Extended SCEPTRE, Vol 1, User Manual, AFWL - TR -73.
- Bowers J. and Sedore S. (1971). SCEPTRE: A computer Program for circuit and system analysis, Prentice Hall, Inc Englewood Cliffs N. J.
- Caballero J. M. y Del Rio, C. (1994). Propagación del olivo enraizamiento de estaquillas semileñosas bajo nebulización. Comunicación I+D Agroalimentaria, 7/94. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.
- Damrath, J. (1981). Greenhouse heating with sun energy. Acta Horticulturae 115.
- Fontanazza, G. (1993). Olivicultura Intensiva Meccanizzata. Edagricole-Edizioni Agricole. pp. 312.

- Grafiadellis, M. (1984). Development of solar systems for heating greenhouses. *Acta Horticulturae* 154, 223 -232.
- Godbey L, Bond T. and 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.
- Incropera F. y DeWitt D. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4ta. Edición, Ed. John Wiley & Sons.
- Matallana, A., Montero, J. (1995). *Invernaderos: diseño, construcción y ambientación*. Ed. Mundi - Prensa.
- Novender W. (1998). Revision and Edition of the Extended SCEPTRE, User manual, Giessen - Friedberg University, Germany.
- Novender W. (1999). SCEPTRE: simulación de circuitos eléctricos no lineales, *Linux Journal*, 3, 41-44.
- 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.
- Pierik R. (1990). Cultivo "In-Vitro" de las Plantas Cultivadas. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. p.p 295.
- Saravia L., Echazú R. y Zunino L. (1990). Características ópticas de materiales de cubierta de invernaderos. *Actas 14va. Reunión Nacional de ASADES*, pp. 323-330.
- 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 y Medio Ambiente, ASADES*, Vol. 4, pp. 8.17-8.22.