

DISEÑO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE INVERNADEROS SOLARES PARA PRODUCCION DE NOGALES

M. Watkins, A. Iriarte¹, S. Bistoni²

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – UNCa

Av. Belgrano 300 – 4700, Catamarca, Argentina. E-mail: watkinsmarcelo@gmail.com

RESUMEN: La optimización del diseño de un invernadero solar depende de una gran cantidad de factores y variables. En algunos casos pequeñas variaciones de un parámetro provocan cambios considerables en la eficiencia del dispositivo, mientras en otros casos los cambios no inciden sustancialmente. El presente trabajo muestra el estudio de sensibilidad del comportamiento térmico de un “invernadero solar” a variaciones en el diseño. Se investiga la influencia del tipo y tamaño de acumuladores de calor, fluidos caloportadores y su velocidad de flujo y el agregado de canchales de lecho de piedra en el interior. Se toma como indicador de eficiencia el aporte extra de calefacción necesaria para mantener una temperatura no inferior a la mínima establecida. Dicho aporte se determina mediante simulación, empleando modelos ajustados previamente en SIMUSOL. El estudio permite identificar y clasificar los parámetros del diseño que tienen mayor incidencia en la estabilidad térmica del dispositivo.

Palabras clave: invernadero solar, simulación de invernaderos, producción de nogales

INTRODUCCIÓN

En la Provincia de Catamarca, durante la última década, se han incrementado notoriamente las plantaciones de nogal, con la aplicación de tecnologías que aseguran una mejor producción. Un problema que limita la continuidad de expansión de estos emprendimientos productivos es la falta de plantas de calidad. Actualmente se están utilizando métodos de propagación que requieren de condiciones climáticas perfectamente controlables. En este sentido el acondicionamiento de invernaderos mediante el empleo de componentes solares es una alternativa que está siendo utilizada por los viveristas de la zona.

El estudio sistematizado de los invernaderos de nogal diseñados para funcionar con aporte solar o mixto ha permitido mejorar notablemente la eficiencia energética de los mismos con el consecuente ahorro y aumento de la producción (Iriarte *et al*, 2002, Iriarte *et al*, 2006).

En trabajos anteriores se describe y simula un canchero tipo lecho de piedra con agua como fluido caloportador. Mediante el ajuste del modelo se determinan los coeficientes de transferencia de calor y se simula el comportamiento del mismo (Watkins, M. y Bistoni S. 2005). Posteriormente se analizan y se simulan camas de enraizamiento que trabajan mediante un sistema de energía mixto sol-gas (García *et al*, 2006), y se proporcionan procedimientos para el diseño y optimización de sistemas de calefacción sol-gas con control automático (Watkins M. y García V. 2007, Watkins *et al*, 2007). En los trabajos siguientes se muestra la integración de los modelos propuestos para la simulación general de una cámara de producción de plantas con aportes solar y auxiliares (García *et al*, 2007) y una propuesta de modelos alternativos simplificados que potencian las características del Software Simusol (Watkins M., Iriarte A. 2008).

Los conceptos desarrollados para realizar el “control automático de aportes auxiliares” y los “modelos simplificados” proporcionan las herramientas necesarias para el estudio sistematizado de la eficiencia energética del invernadero mediante simulación. Para determinarla, durante la simulación del dispositivo previamente ajustado, se inyecta un “pulso de energía” en los periodos temporales en que la temperatura es inferior a la consignada. Dicho pulso tiene la duración necesaria para elevar la temperatura en el interior del recinto, compensando las pérdidas.

Posteriormente, aprovechando las funciones del software Simusol (Saravia L. y Saravia D. 2000), se integran todos los pulsos utilizados para determinar el aporte global de energía extra que necesita el invernadero. Dicho ensayo se repite, modificando uno a uno los parámetros en estudio y se comparan los resultados.

En consecuencia, el presente trabajo plantea un análisis que permite determinar criterios de diseño empleando los modelos simplificados de sistemas complejos (con muchas componentes), el control automático de aportes auxiliares y el método del pulso de energía en la determinación de parámetros relevantes del dispositivo a diseñar.

1 INENCO - Investigador del CONICET - Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa

2 Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa

MATERIALES Y METODOS EMPLEADOS

Descripción del invernadero solar

El sistema, construido en el predio de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA – Catamarca, Argentina (28,30 Latitud Sur, 66° Log. Oeste, 600 m s.n.m.), está constituido por una cubierta exterior de 21 m de largo por 15 m de ancho y una altura máxima de 3 m en el macro túnel del techo. Adentro de esta cubierta se encuentra una cámara de 20 m de largo por 14,5 m de ancho y una altura plana de 2 m, constituyendo la doble cubierta protectora. (Figura 1). Las cubiertas, los laterales y los frontales son de polietileno de 150 micrones de espesor con aditivos que filtran el U. V. entre 700 y 1400 nm, con una transmitancia global de 0,88.

El eje principal del dispositivo está orientado en la dirección E-O. En las paredes laterales, Norte y Sur, tiene instalados colectores solares de plástico que descargan el agua caliente en un acumulador externo de 15m³. En el lado Norte se instalaron 22 placas colectoras transparentes (17,6 m²) y 21 negras (16,8 m²) configurando una superficie colectora de 34,4 m² y del lado Sur, 40 negras con una superficie de colección de 32 m².

Los canteros del invernadero, contruidos en lecho de piedra actúan como intercambiadores de calor y porta macetas. Se construyeron tres canteros de 1m de ancho por 0,60 m de profundidad y un largo de 20 m, con una separación entre canteros de 3 m.

Se dispone además de un caloducto que extrae el aire caliente acumulado entre las dos cubiertas superiores y lo envía a un acumulador externo constituido por lecho de piedra de 15 m³.

La característica fundamental del diseño del "invernadero solar" se basa en la colección de radiación solar incidente sobre el invernadero para ser usada en el momento que se requiera, generalmente durante la noche. Se extrae, durante el día, el calor excedente por medio de los colectores solares de agua y mediante el caloducto, y se acumula en los dos depósitos externos. Un sistema automático de control abre o cierra el paso de agua y aire caliente en una u otra dirección, según se requiera.

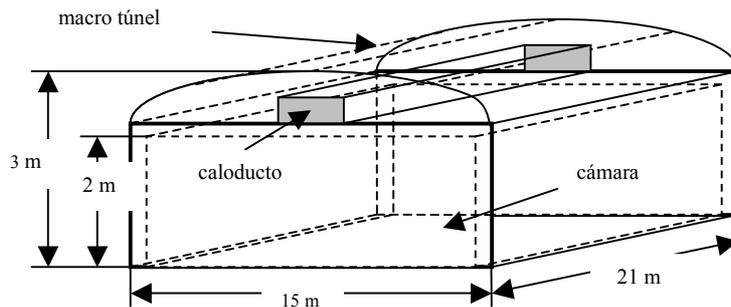


Figura 1 – Esquema del invernadero de doble cubierta

Procedimiento de ajuste del "modelo simplificado"

El método empleado para el ajuste de los modelos simplificados es el siguiente:

1. Se divide el sistema en subsistemas dejando puntos de interrelación que permitan integrarlos fácilmente.
2. Se ajusta cada uno de los subsistemas aplicando las técnicas tradicionales de modelado.
3. Se desechan todos los acumuladores que representen transitorios de corta duración, comparada con el tiempo de la simulación.
4. Se reemplazan todos los conjuntos de resistencias serie o paralelo que sea posible, incluso aquellos conjuntos que representen dos o tres procesos de transferencia de calor diferentes. La resistencia equivalente se selecciona de acuerdo a la transferencia predominante que se está substituyendo.
5. Se verifica y si es necesario se ajustan los coeficientes de transferencia de los nuevos componentes. Si bien este proceso lleva a una pérdida de detalle de los procesos térmicos adentro del dispositivo, permite un análisis sistémico global que responde satisfactoriamente.

Para realizar el balance de energía en cada uno de los sistemas que constituyen el invernadero se han tenido en cuenta las siguientes premisas:

- El aire dentro del invernadero es homogéneo, no hay gradientes verticales.
- Las plantas en el interior del invernadero están a la misma temperatura del aire.
- El invernadero se encuentra totalmente cerrado, solamente existe intercambios de aire por el sistema de circulación del túnel.
- No hay condensación en las cubiertas.
- La transferencia de calor con el suelo (18 °C) es sólo en la dirección vertical.

Subsistema 1: Colectores de agua y acumulador

La Figura 2 muestra los detalles del modelo. Los datos experimentales de entrada del subsistema 1 son, la radiación solar sobre plano vertical representada en el gráfico con Q_{10} , Q_{11} , Q_{20} y Q_{21} y la temperatura medida en el interior del invernadero, simbolizada con la fuente de tensión E_5 , conectada al Nodo 5. Los Nodos S_2 , S_3 , S_4 y S_5 representan a los colectores de calor distribuidos en el interior del invernadero.

Los flujos de calor y masa designados con M_{10} , M_{11} , M_{12} , M_{20} , M_{21} y M_{22} constituyen el circuito del fluido caloportador. El resto de los componentes simulan las pérdidas y los puntos de acumulación de energía del sistema. Así, por ejemplo, las resistencias designadas S_{10} y S_{11} representan las pérdidas convectivas hacia el ambiente interior de los colectores.

El Nodo 32, punto de control de esta etapa del modelado, simboliza al acumulador de agua caliente. El ajuste del modelo se realiza comparando la temperatura del agua del acumulador simulada con los datos experimentales.

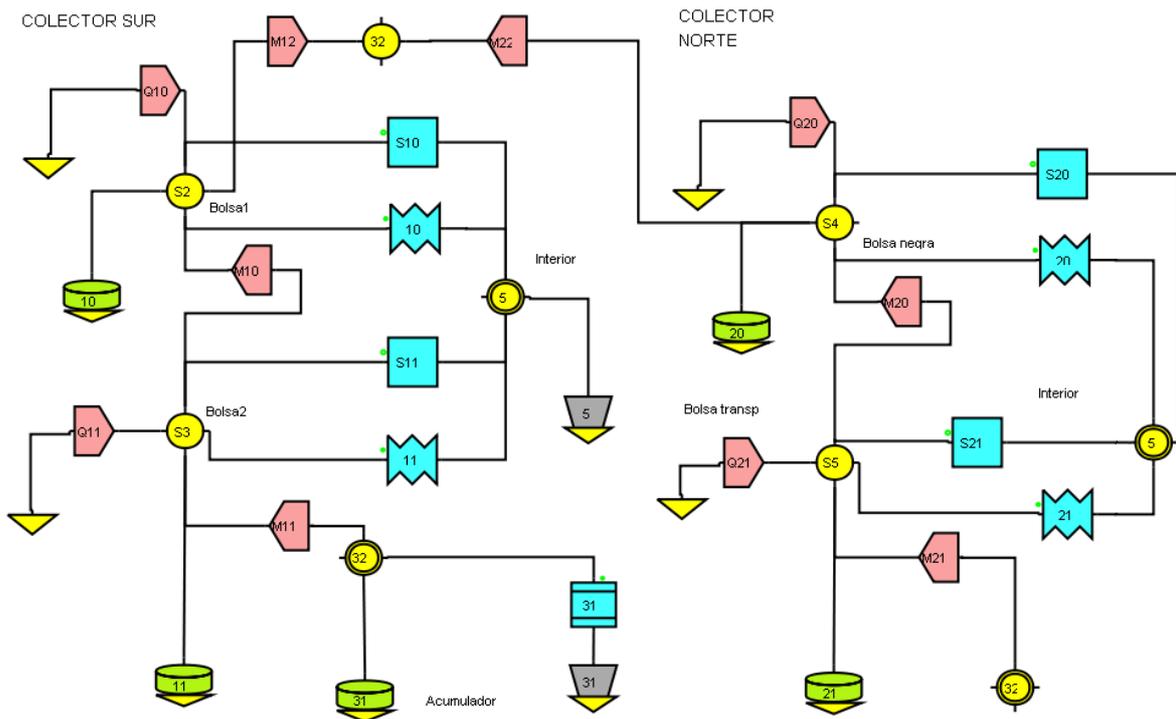


Figura 2 – Modelo Simulink del Subsistema 1

Subsistema 2: Lecho de piedra y túnel colector de aire caliente.

En el subsistema 2 el fluido caloportador es el aire circulante en el espacio superior del invernadero entre el techo de la cámara interior y la cubierta externa del macro túnel. Este fluido es recogido en un caloducto dispuesto a lo largo del túnel e, impulsado por un forzador, se inyecta en el lecho de piedra que cumple la función de acumulador. En el diagrama (Figura 3) el Nodo 6 simboliza el túnel. A dicho nodo convergen el flujo de calor Q_2 representante de la radiación solar sobre plano horizontal y los flujos de masa M_6 y M_7 , agentes portadores del aire entrante (M_6) y saliente (M_7). Se completan los circuitos de aire caliente mediante los flujos de masa M_3 , M_4 y M_5 .

El Nodo 41 simboliza al lecho de piedra. El aire caliente se introduce a dicho nodo mediante M_7 y se lo extrae empleando M_4 quien lo transporta hacia el interior del invernadero (nodo 5) y desde este al exterior empleando el flujo M_5 . Durante la noche se desactivan los flujos M_5 , M_6 y M_7 . Quedan funcionando solamente los flujos M_3 y M_4 quienes transportan el aire entre el interior de la cámara y el lecho de piedra.

Para el correcto ajuste del modelo se agregaron las fuentes E_3 , E_4 , E_5 y M_{41} , que permiten incorporar a la simulación los datos experimentales de: Temperatura exterior, temperatura de cielo, temperatura interior del invernadero y la temperatura del suelo respectivamente. El parámetro seleccionado para la verificación del ajuste es la temperatura del lecho de piedra. Las curvas producidas por Simulink en el Nodo 42 se comparan con los datos experimentales del mismo punto (Fig. 5).

Subsistema 3: Interior del invernadero

El tercer subsistema es el que permite realizar la integración final del modelo. En este se simula la temperatura interior del invernadero, representada –como en los dos modelos anteriores– por el Nodo 5.

Puede observarse que el Nodos 6 correspondientes al túnel ya están integrados en este modelo. La temperatura del lecho de

piedra se ingresa como dato experimental. Este recurso permitirá crear las condiciones de funcionamiento del modelo replicando la situación ya ajustada en el modelo anterior. Los flujos de calor designados como Q1 y Q2 representan la radiación solar sobre plano vertical y plano horizontal, respectivamente. Radiación horizontal y radiación vertical se determinaron experimentalmente. La primera ingresa al interior del invernadero a través del túnel o techo, mientras que la segunda incide en las paredes norte y sur.

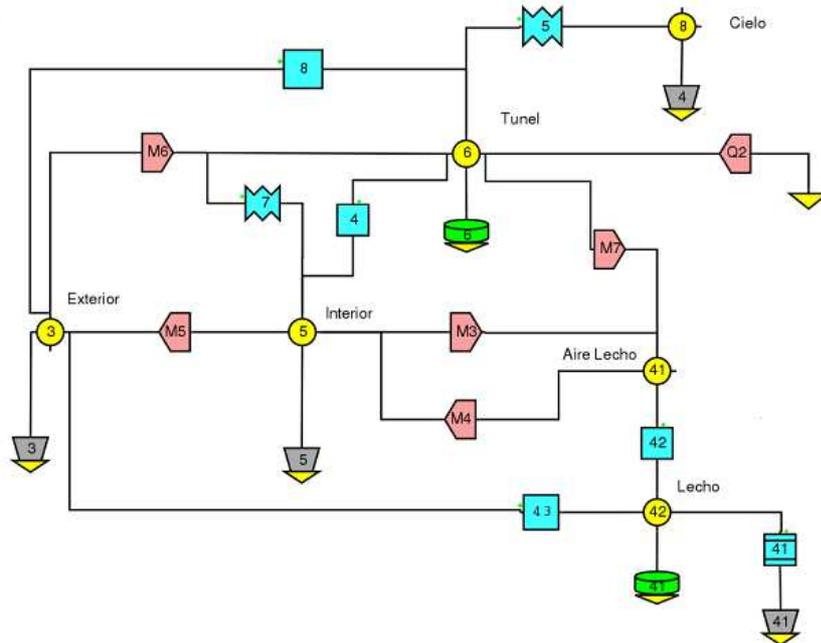


Figura 3 – Modelo Simulink del subsistema 2 - Lecho de piedra y túnel colector

En todos los casos las variables de ajuste de los modelos son los coeficientes de absorción y pérdida por convección, conducción y radiación. El resto de los parámetros no se ajustan ya que son datos determinados experimentalmente o se obtienen de trabajos anteriores.

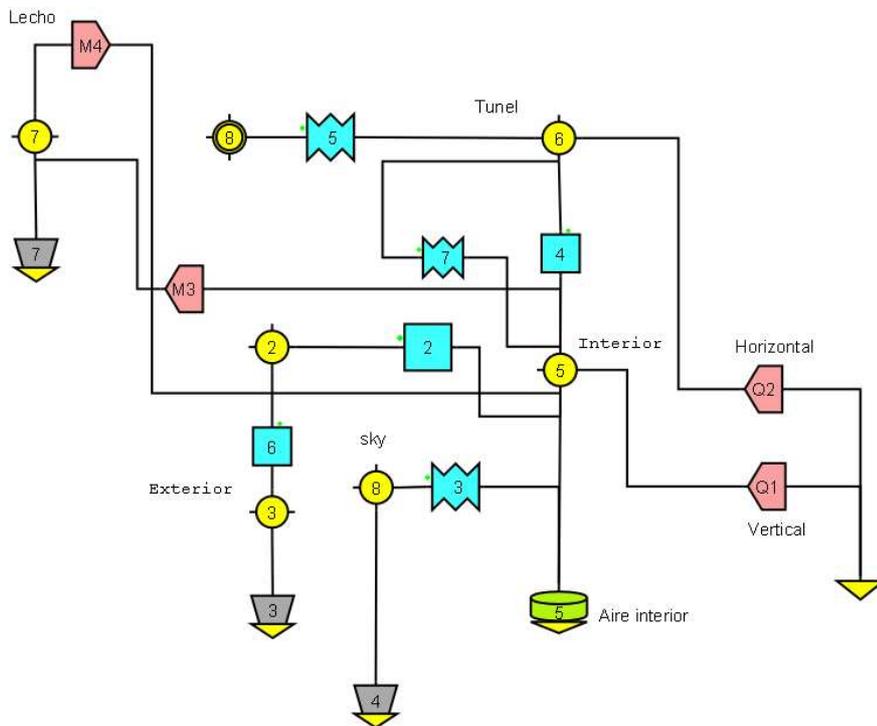


Figura 4 – Modelo Simulink del subsistema 3 - Interior del invernadero

Integración de los subsistemas y verificación del ajuste

Los parámetros seleccionados para la verificación del ajuste en esta etapa son: la temperatura del lecho de piedra y la temperatura interior del invernadero. Las curvas producidas por Simusol en los Nodos 42 y 5 se comparan con los datos experimentales de ambos puntos. La curva resultante puede verse en la Figura 5. El error cuadrático medio calculado, en ningún caso superó el 2%, por lo que se considera que el ajuste es apropiado. También pudo verificarse ajuste en el acumulador de agua o poza.

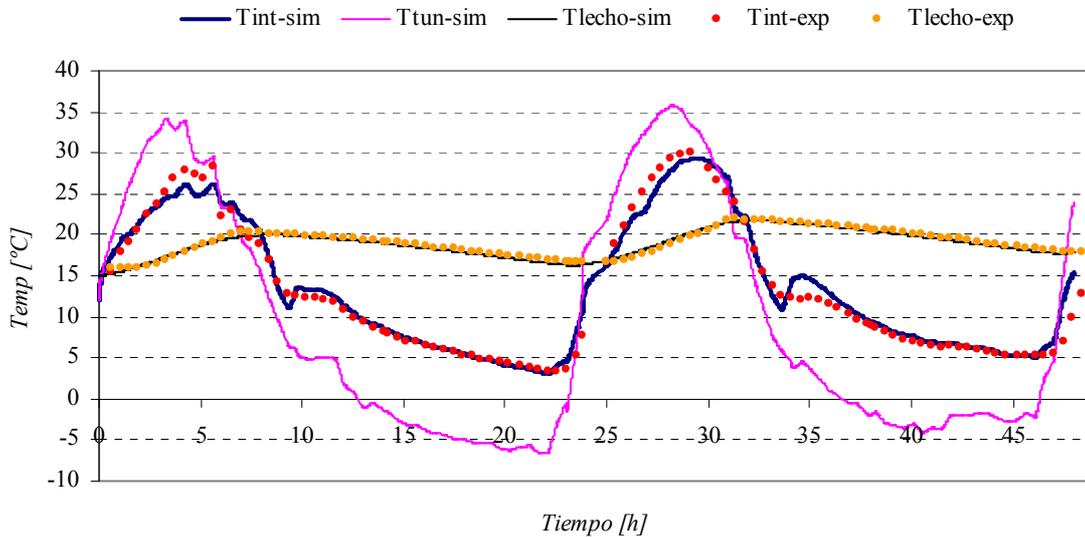


Figura 5 – Curvas de ajuste del modelo integrado

Pulso de energía

Con el fin de determinar la eficiencia térmica del invernadero se inyecta un pulso de energía auxiliar directamente en el interior del dispositivo mientras la temperatura interior es inferior a una determinada temperatura de consigna. Mediante un modelo que simula el control automático de la fuente de energía (Watkins et al, 2007) se abre o cierra la llave que habilita o deshabilita dicha fuente auxiliar. La potencia de la misma se selecciona de manera que supere ampliamente la media requerida, de modo que responda satisfactoriamente en los picos de consumo. Para las simulaciones del invernadero en estudio se trabaja con una fuente de 20 Kw. El control se establece en un rango muy ajustado, casi sin histéresis, ya que la fuente de calor comienza a trabajar cuando la temperatura es inferior a 12°C y cierra a los 12,1°C. De este modo la temperatura en el interior del invernadero nunca resulta inferior al mínimo de 12°C tal como puede verse en la figura 6 (trazo continuo azul).

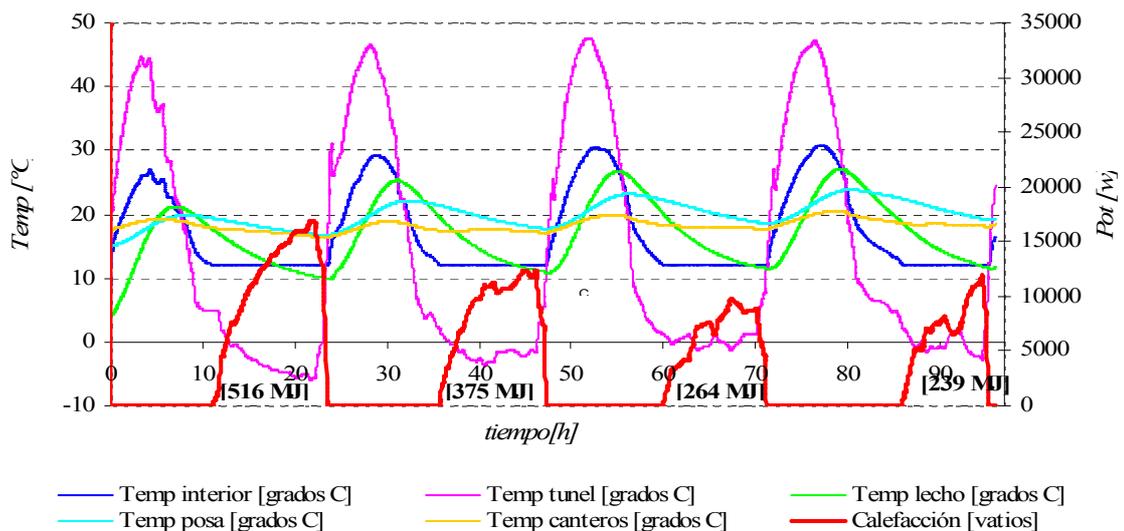


Figura 6 – Curvas del “pulso de energía”

Los pulsos resultantes, se integran y se representan en el gráfico. El valor de la energía total aportada en cada período nocturno se indica en el mismo gráfico. Puede verse que durante los primeros días el requerimiento es alto debido a que el dispositivo aún no se encuentra en régimen. La potencia máxima requerida en estas condiciones resulta ser de 17 Kw.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de sensibilidad

Se entiende por sensibilidad, la mayor o menor incidencia que tiene la modificación de un parámetro de diseño en la eficiencia térmica del invernadero.

El éxito logrado en los ensayos con el modelo ajustado, denominado también modelo de referencia, admite la posibilidad de realizar experimentos introduciendo cambios, con el fin de comparar resultados, e incluso realizar un estudio de la sensibilidad del invernadero a dichos cambios.

Se trabaja con las siguientes configuraciones:

- 1 Se reemplaza el lecho de piedra por un lecho de agua respetando la fracción de huecos que debe asignarse pero con el volumen de 15 m³ original. La curva correspondiente muestra un importante incremento en el consumo de energía en los primeros dos días, debido a la mayor masa acumuladora que es preciso calentar. En el último día de la simulación la energía necesaria es levemente inferior a la determinada para el modelo de referencia (curva denominada AJUSTE).
- 2 Se reduce a la mitad el volumen de la poza acumuladora de agua caliente. La curva se muestra en la figura 7. Aunque mejora levemente, puede notarse que casi no hay diferencia con el modelo de referencia. Este resultado está indicando que la poza está algo sobredimensionada, ya que puede reducirse a la mitad su volumen sin que se produzca un cambio relevante.
- 3 Se anula la circulación de fluidos caloportadores, dejando solamente la circulación de agua en los canteros. Este ensayo se hace para determinar el aporte de calor de los sistemas solares. La curva obtenida muestra un andar casi idéntico al de la curva de referencia, unos 200 MJ por encima. Se infiere de este modo que los dispositivos solares aportan unos 200 MJ (40% de la energía requerida) a la estabilidad de la temperatura en el invernadero.
- 4 En el siguiente ensayo además de anular los fluidos caloportadores se anula la circulación de agua en los canteros. La curva sube unos 100 MJ más arriba. Se deduce que ese es el aporte de los canteros.
- 5 Se duplica la velocidad del flujo de aire en el túnel superior del invernadero para indagar sobre su incidencia en la eficiencia. El resultado muestra una curva cuyo andar es casi igual al del modelo ajustado inicialmente. Se infiere de este modo, que aumentar la velocidad del aire no introduce mejoras sustanciales en la eficiencia térmica, provocando solamente un mayor consumo de energía eléctrica auxiliar.

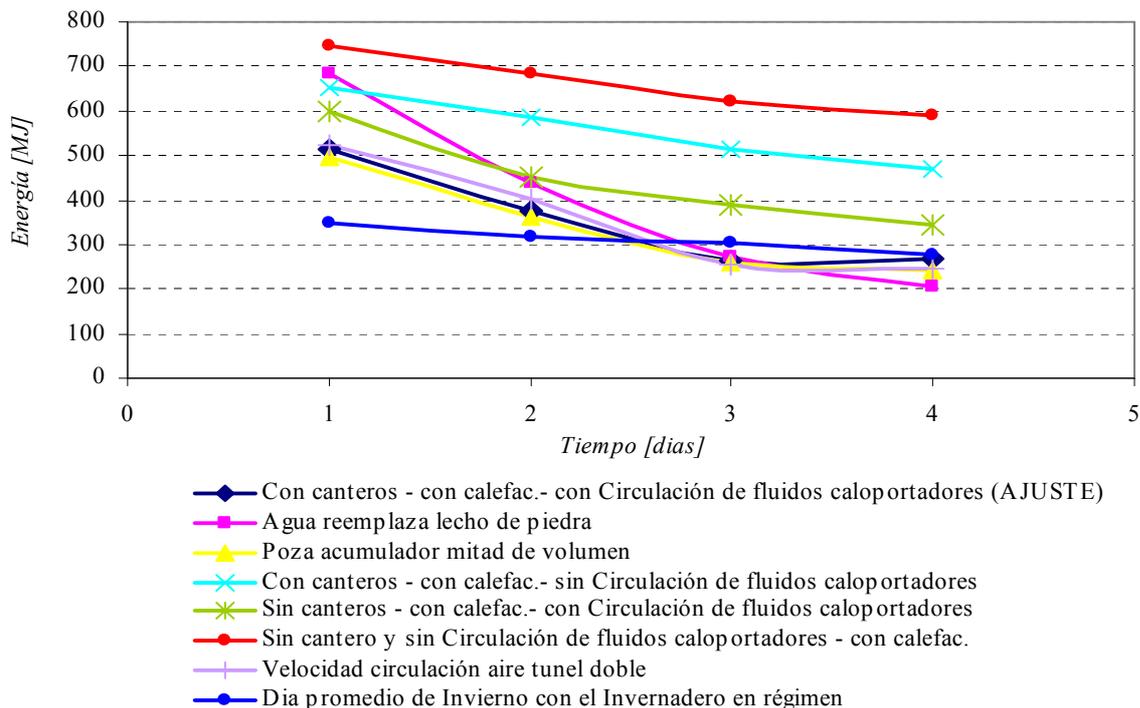


Figura 7 – Sensibilidad

Variaciones de la temperatura de consigna

Otros ensayos realizados con el modelo ajustado consisten en modificar la temperatura de apertura y cierre de la llave de control del sistema automático. Tal como se explicó anteriormente, esa llave abre o cierra el paso de la energía auxiliar. Se ensaya con 10°C, 12°C y 14°C de temperatura mínima de trabajo en el invernadero, por ser este el rango de temperaturas que requieren los plantines de nogal en las primeras etapas de crecimiento. Los resultados se muestran en la Figura 8.

Un resultado relevante de este ensayo permite mostrar que, para las tres temperaturas de consigna, después del tercer día, el invernadero está en régimen. A su vez, lograr un aumento de 2°C implica incrementar entre 160 y 180 MJ diarios el aporte de

energía auxiliar.

Este ensayo indica claramente que al dimensionar la caldera o los dispositivos encargados de los aportes auxiliares se debe prever un gasto de 125 MJ diarios para una temperatura mínima de 10°C, 250 MJ diarios para mantener el invernadero a 12°C y 375 MJ diarios para sostener la temperatura en 14°C, con el invernadero funcionando en régimen.

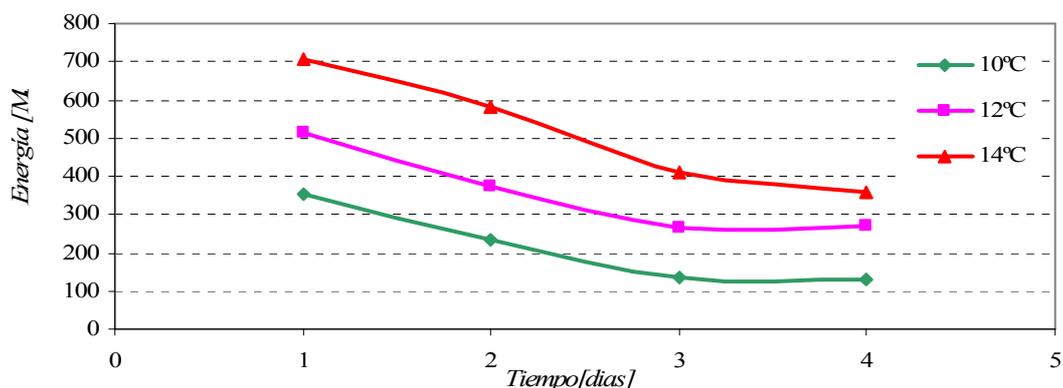


Figura 8 – Energía auxiliar para diferentes temperaturas de consigna

Si a estos valores de energía mínima los dividimos por el volumen del invernadero, podemos determinar la energía auxiliar por unidad de volumen que este tipo de invernaderos requiere para funcionar en invierno. El resultado de dicho cálculo se muestra en la Figura 10. La línea trazada muestra una intersección con el eje de temperaturas en los 8 °C aproximadamente. Ello implica que el invernadero en estas condiciones podría trabajar sin aporte auxiliar.

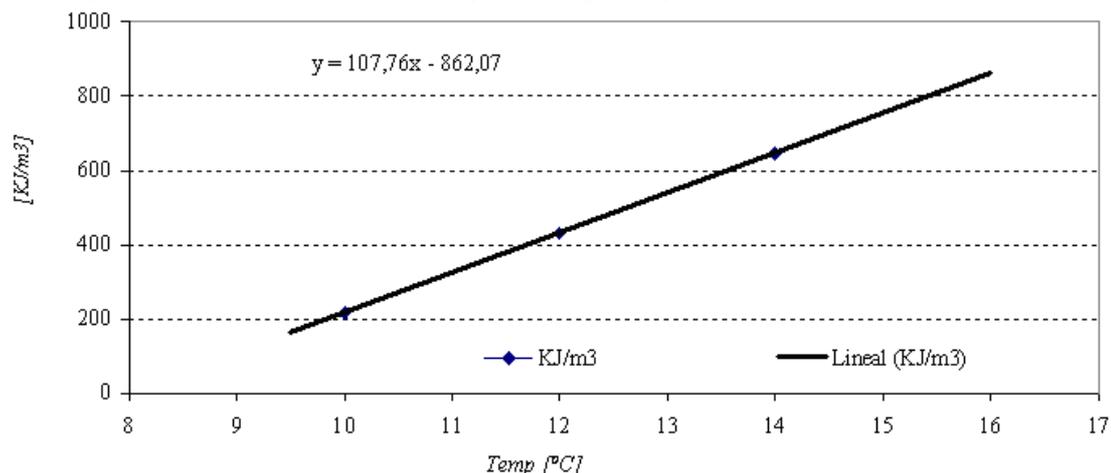


Figura 10 – Energía por unidad de volumen en función de la temperatura mínima consignada

CONCLUSIONES

El procedimiento denominado “pulso de energía” resulta apropiado para el cálculo de la eficiencia energética. Los resultados en general son coherentes. Es una herramienta de gran potencialidad para el diseño y verificación de invernaderos.

Reemplazar el lecho de piedra por lecho de agua sólo aumenta el consumo de energía en los primeros días y no se observa un incremento importante en la eficiencia térmica de los dispositivos solares.

Se comprueba que la poza acumuladora está sobredimensionada. Acumular más agua caliente no se traduce en un ahorro de energía, ya que esta no se transfiere al interior del invernadero.

Se determina que el invernadero en la estación invernal trabaja con un 60% aproximadamente de aportes solares y un 40% de aportes auxiliares.

El incremento de la velocidad de circulación del aire caliente entre invernadero y lecho de piedra no se traduce en una mejora de la eficiencia.

Se determina que el invernadero, bajo estas condiciones climáticas, podría funcionar en régimen sin aportes auxiliares admitiendo una temperatura mínima de 8 °C, temperatura no recomendada para la reproducción de nogal, pero apta para otras especies.

Queda planteada la posibilidad de trabajar en desarrollos más generales que permitan la determinación directa de dimensiones, potencias y velocidades de flujo para invernaderos cuyas especificidades sean establecidas previamente y

utilizando datos estadísticos del clima típico del lugar de instalación del dispositivo.

REFERENCIAS

- García V., Iriarte A., Watkins M., Lesino G. y Rigotti J., (2006). “Calentamiento de Camas de Enraizamiento mediante un Sistema Mixto Sol - Gas”. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, pp 04-01 04-08.
- García V., M. Geal, M. Watkins, y A. Iriarte, (2007). “Integración de modelos para la simulación de una cámara de producción de plantas con aporte solar y auxiliares”. Revista AVERMA, Vol. 11, pp. 8.131 – 8.138.
- Iriarte A., L. Saravia, C. Matias y L. Tomalino, (2002) “Invernadero Acondicionado con energía solar para rusticar plantas”. Revista ERMA, (Energías Renovables y Medio Ambiente) Vol. 11, pág. 25 - 33.
- Iriarte A., Gea M., García V. y Placco C., (2006). “Simulación Numérica de una Cámara Bioclimática para Microinjección de Plantines de Nopal”. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, pp 08-31 08-38.
- Saravia L. y Saravia D. (2000) “Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad”. Revista Avances en Energías Renovables y M.A., Vol. 4, pp. 8.17 – 8.23.
- Watkins M., S. Bistoni, (2005). “Canteros tipo lecho de piedra calentados con agua en invernaderos. Ensayos preliminares” – Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 9, 2005. pp 02-07 a 02-12.
- Watkins M., V. García (2007) “Simulación de sistemas de aprovechamiento solar térmico mixto con control automático”- Actas Jucen 2007 – Catamarca – pp. 53 – 54.
- Watkins M., V. García, A. Iriarte, (2007). “Aplicación de Simusol para el diseño de sistemas de calefacción sol-gas con control automático”. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, pp. 2.31 – 2.36.
- Watkins M., A. Iriarte, (2008) “Ajustes preliminares de modelos alternativos para diseño y simulación de invernaderos solares. Revista “Ciencia” – Facultad de Ciencias Exactas y Nat. – UNCa - En prensa.

ABSTRACT

The optimization of the design of a greenhouse depends on many factors and variables. In some cases small variations of a parameter cause considerable changes in the efficiency of the device, while in other cases the changes do not affect substantially it. The present work shows the sensibility analysis of thermal behavior of a solar greenhouse to variations in the design. This greenhouse is used to produce walnut plants. Different heat storages types and their sizes are analyzed, as well as the influence of flow rate of working fluids, and the contribution of a stone bed bench to the performance of the system. The extra heating demand to maintain a temperature not less than the minimum established is taken as the efficiency indicator. This demand is determined by means of simulation, using fitted models in SIMUSOL. The study allows identifying and classifying the parameters of the design that have bigger impact in the thermal stability of the device.

Key words: solar greenhouse, simulation of greenhouses, walnut plants production.