

SIMULACION DE FLUJOS ENERGETICOS Y REQUERIMIENTOS DE CALEFACCION AUXILIAR EN INVERNADEROS SOLARES

A. Iriarte², V. Luque, S. Bistoni y L. Saravia^{1,2}
INENCO, Facultad de Ciencias Agrarias – U.N. de Catamarca
M. Quiroga 93, 4700- Catamarca. iriarte@plab.unca.edu.ar

RESUMEN: La valoración de los términos del balance térmico en un invernadero permite establecer el flujo energético que es necesario incorporar al mismo para mantener condiciones ambientales adecuadas al cultivo. Esta determinación se realiza de un modo sencillo en estado estacionario, pero requiere de cálculos complejos cuando se realiza en estado transitorio. En el presente trabajo se describe un método de cálculo de estos requerimientos considerando el problema desde el punto de vista eléctrico. En el nodo del circuito que representa la temperatura del aire interior al invernadero se conecta un generador de corriente cuyo valor en función del tiempo es algo mayor a las pérdidas instantáneas. La corriente que se permite ingresar al circuito es el aporte auxiliar necesario para reestablecer la temperatura óptima del invernadero. Se muestran los resultados obtenidos para distintos meses en los que se tuvieron en cuenta las temperaturas mínimas absolutas correspondientes a los últimos 20 años. Se analizan también los flujos térmicos aportados por los equipos solares incorporados al invernadero.

Palabras clave: invernaderos, modelo térmico - eléctrico, calefacción solar, pérdidas

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y expansión de los invernaderos para producción de vegetales, flores y plantines arbóreos se ha incrementado durante los últimos años como consecuencia de las condiciones favorables del mercado. En el caso de este último tipo de producción, para mejorar el nivel de supervivencia de los plantines es indispensable la rusticación de las plantas en ambientes calefaccionados, antes de sacarlas al mercado. La carga de calor que necesita el invernadero - rusticadero, en estado estacionario, es igual al flujo de energía desde el invernadero al ambiente y depende de un número considerable de parámetros relacionados con las condiciones ambientales. Debido a las fluctuaciones de estos factores ambientales el calor consumido es variable y con fluctuaciones muy importantes que influyen en la predicción de la cantidad de energía necesaria para incrementar en un grado la temperatura del invernadero.

Los diferentes modelos de invernaderos estudiados hasta el momento, tanto en estado estacionario (Walker, 1965; Selcuk, 1971; Takani y Uchijima, 1977, Iriarte, 1996) como en estado transitorio (Takakura *et al.* 1971; Avissar y Mahrer, 1982; Levit y Gaspar, 1988) realizan el cálculo de los flujos energéticos en cada caso, pero la determinación a lo largo del tiempo de las contribuciones energéticas de sistemas activos, especialmente solares, incorporados al invernadero resulta compleja.

En el presente trabajo se describe un modelo en estado transitorio para la determinación de los flujos energéticos y las necesidades de calefacción auxiliar para invernaderos que utilizan como fuente de calor la energía solar. El modelo permite determinar el aporte de energía solar de las distintas componentes asociadas al invernadero. Se analizan los resultados obtenidos para los meses de Abril a Setiembre y se muestran los resultados para el día menos favorable del mes de julio correspondiente a los últimos 20 años. Se analizan también los flujos térmicos aportados por los equipos solares incorporados al invernadero.

MODELO DINÁMICO DEL "INVERNADERO SOLAR"

Descripción general

Para la modelización se ha considerado un invernadero que tiene una superficie cubierta de 300 m² con doble cobertura, formado por dos macrotúneles de 7,5 m de ancho, 3,5 m de altura máxima, 2 m de altura en los laterales y una longitud de 20 m. En los laterales tiene colectores solares de plástico transparentes y negros los que están asociados con un acumulador externo de agua (15m³). Los canchales del invernadero tienen intercambiadores de calor agua - macetas. Dispone de un caloducto para extraer aire caliente entre las dos cubiertas y acumularlo en un lecho de piedra exterior de 15 m³. La característica fundamental de este diseño de "invernadero solar" se basa en coleccionar la radiación solar incidente sobre el invernadero, extraer durante el día el calor excedente del aire interior por medio de los colectores solares y por el caloducto, acumularlo y usarlo en el momento que sea necesario para calentar el aire y el suelo del mismo (Iriarte *et al.*, 2000).

A los efectos del modelo el invernadero puede considerarse como formado por diferentes elementos que intercambian calor y masa. La transferencia en sentido vertical se da a través de los siguientes elementos: cobertura exterior, el aire entre cubiertas, la

Parcialmente financiado UNCa, ANPCyT

¹ INENCO - Salta

² Investigador del CONICET

cubierta interior, las plantas, el suelo y los canteros. Los colectores solares internos contribuyen con flujos térmicos horizontales a través de los distintos elementos que son de Norte a Sur: cobertura plástica del invernadero, cubierta exterior de los colectores solares de plástico, placas colectoras, cubierta interior, aire - plantas, placas colectoras negras y cobertura exterior. Las placas colectoras ubicados en el sector Sur intercambian calor directamente con el ambiente interior del invernadero.

El balance de energía tiene en cuenta además de los aportes convectivos y radiativos, el flujo másico proveniente del acumulador en lecho de piedra. Las distintas componentes que intervienen en el balance de energía se representan en el diagrama de flujos energéticos que se muestra en la Fig. 1.

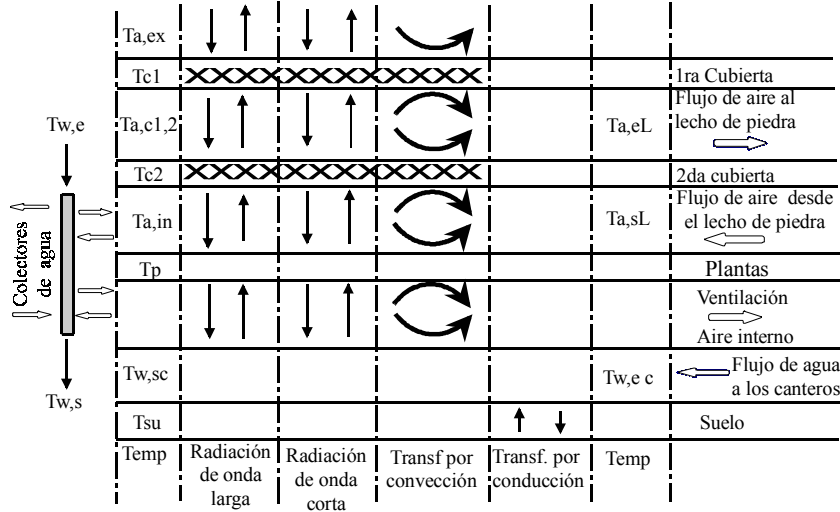


Figura N° 1. Esquema de los flujos de energía y masa que participan de los intercambios en el invernadero.

En dicha figura $T_{a,ex}$ es la temperatura del aire exterior; $T_{a,in}$ temperatura del ambiente interior al invernadero; T_{c1} y T_{c2} son las temperaturas de las cubiertas $c1$ y $c2$; $T_{a,c1,2}$ es la temperatura del aire entre las dos cubiertas; $T_{a,eL}$ y $T_{a,sL}$ son respectivamente las temperatura del aire donde succiona y donde inyecta el ventilador del lecho de piedra; T_p se refieren a la temperatura de las plantas; $T_{w,ec}$ y $T_{w,sc}$ temperaturas del agua a la entrada y salida de canteros; T_{su} es la temperatura del suelo dentro del invernadero y $T_{w,e}$ y $T_{w,s}$ temperaturas del agua a la entrada y salida de los colectores laterales respectivamente. Se muestran también los intercambios de flujos energéticos de onda larga, corta, conducción y convección y los flujos de intercambio con otros sistemas.

Modelo con analogía térmica - eléctrica

Los intercambios energéticos indicados en la figura N° 1 pueden ser representados utilizando la analogía térmica - eléctrica ampliada (Saravia *et al.* 2000, Iriarte A., 2001). En este modelo térmico se han ubicado nodos en el ambiente exterior, cobertura exterior, cubierta interior, aire entre las dos cubiertas, superficie del suelo y 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 (E) respecto de una referencia. 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 (C) con una capacidad equivalente al producto entre el calor específico y la masa de cada capa, lo que representa la acumulación sensible en el suelo para las diferentes capas. Estos capacitores están referidos a una tensión de referencia, siendo habitualmente tierra (referencia de temperatura cero Celsius).

Las resistencias están relacionadas con los procesos de transferencia convectivas, conductivos o radiativos. Las fuentes de corriente que representan el flujo de energía (JQ) proveniente de la radiación solar están conectadas con los nodos de la cobertura exterior, cubierta interior y superficie del suelo y referidas a tierra. En el nodo correspondiente al ambiente interior del invernadero (nodo 5) se adicionan las infiltraciones como una fuente de corriente, representada por un flujo de masa térmica (JM_Q) referida a la temperatura del ambiente exterior (nodo 6) para el aire que ingresa y a la temperatura del ambiente interior al que sale.

Necesidades energéticas. Aporte auxiliar

El modelo térmico - eléctrico permite determinar los flujos de intercambio de calor entre las distintas componentes del sistema a través del cálculo de las corrientes en los elementos del circuito, siendo la pérdida total la suma de estas corrientes.

La determinación de las necesidades energéticas para mantener ciertas condiciones dentro del invernadero necesitan de cálculos auxiliares que no resultan sencillos, especialmente cuando existen sistemas activos funcionando dentro del mismo. Pero estos

cálculos se simplifican si se considera el problema desde el punto de vista eléctrico y se conecta en el nodo 5 del circuito (nodo correspondiente al aire interior del invernadero) un generador cuya corriente, en función del tiempo, sea algo mayor a la pérdida en cada intervalo. Estas corrientes se obtienen de un circuito que representa un invernadero en régimen espontáneo, es decir sin ningún tipo de calefacción, figura 2-a. El funcionamiento de este generador se controla mediante un relé representado en el programa de simulación por una función Si/No (on-off), que cumple con las siguientes condiciones: cuando la temperatura en el nodo 5 es menor que la temperatura óptima (T_{op}) el relé dejar pasar la corriente del generador (JQL), si esta temperatura es igual o mayor que T_{op} , el relé no deja pasar corriente (se abre). En esta última situación el circuito representa al invernadero en régimen espontáneo al cual se le inyecta un flujo para calentamiento, figura 2-b. La corriente que deja pasar el relé es precisamente el aporte auxiliar necesario para mantener la temperatura del aire en el interior del invernadero en un valor constante predeterminado. En este caso se eligió como T_{op} la temperatura de 12 °C ya que este valor coincide con la mínima biológica establecida para olivo (Iriarte *et al.*, 2000).

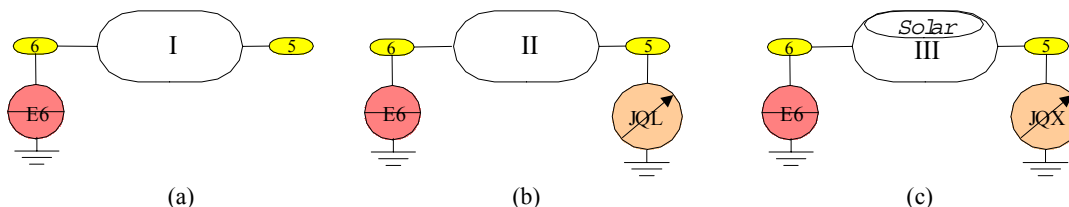


Figura N° 2. Esquema de los circuitos equivalente del invernadero; a) invernadero en régimen espontáneo; b) invernadero en régimen espontáneo con generador JQL; c) invernadero con aporte solar y generador JQX.

El mismo análisis se realiza simultáneamente en el circuito que representa un invernadero con componentes para la colección y acumulación de energía solar activos y pasivos, y con inyección de un flujo para calentamiento mediante un generador, figura 2-c. En este caso además del generador están conectadas las componentes que representan el aporte solar. De la comparación de los resultados de estas dos situaciones se determina la energía entregada por los sistemas solares incorporados al invernadero. Para la resolución numérica de los distintos circuitos eléctricos se empleó el programa SCEPTRE (System for Circuit Evaluation and Prediction of Transit Radiation Effects) que a través de "Stored model" es posible constituir modelos como elementos de un circuito. Esto permite simular distintas situaciones del invernadero simultáneamente (Iriarte A., 2001, Becker D., 1998).

Para el programa es necesario disponer de los datos horarios de temperatura ambiente exterior ($T_{a,ex}$), radiación horizontal y vertical. Para la obtención de la $T_{a,ex}$ en función del tiempo se utilizó la ecuación de ajuste para climas secos y cálidos del SIMEDIF para Windows (Flores, 2003) con datos de temperatura mínima absoluta de los últimos 20 años. Se eligió el periodo Abril - Setiembre para calcular los flujos y necesidades energéticas, en razón de que en este periodo la simulación del invernadero en régimen espontáneo muestra temperaturas del ambiente interior ($T_{a,in}$) por debajo de 12 °C. Con respecto a los datos de radiación se utilizaron los promedios de los últimos 7 años para los días de mínima absoluta considerados.

RESULTADOS

Simulación

Para los meses citados anteriormente se compararon las temperaturas del aire exterior e interior del invernadero para las tres situaciones del invernadero para el día más desfavorable de cada mes durante los últimos 20 años. El comportamiento fue similar para todos los meses considerados. En la figura 3 se muestra la evolución de estas temperaturas para dos días del mes de julio donde también se incluyó la temperatura ambiente exterior obtenida de la mínima absoluta del mes. Se utilizaron dos días, el anterior y el que corresponde a la temperatura mínima absoluta, con el propósito de estabilizar el cálculo.

Como se ve la temperatura interior para el invernadero en régimen espontáneo (caso I) se mantiene en valores menores a 12 °C, entre las 24:50 y las 11:10 horas del segundo día. En el mismo horario se advierte que las temperaturas que corresponden al caso II y III, con inyección de flujos de energía, están por encima de la temperatura de referencia, lo que indica que el aporte de calor producido por las fuentes ha sido suficiente para elevar la temperatura. En régimen espontáneo la temperatura descendió a 3°C cuando la temperatura exterior tuvo el valor mínimo de - 5 °C.

Las diferencias en las temperaturas que se observan durante el primer día no son significativas en este análisis debido a que son originadas por el ajuste del programa. Pero el comportamiento que se observa en el intervalo entre las 17 horas y 24 horas se repite el segundo día. En el inicio de este intervalo (17 horas) la temperatura del interior del invernadero en régimen espontáneo (I), con el generador (II) y con el generador más aporte solar (III) son 34,5 °C, 36,3 °C y 36,7 °C respectivamente; posteriormente a las 17:20 horas estas temperaturas se igualan, mientras que la temperatura del ambiente exterior es de 18 °C. A partir de las 18 horas se observa un cambio importante en la pendiente de la curva para el invernadero (I) y para el invernadero (III) mientras que el descenso de la temperatura para el invernadero (II) es más suave. Este cambio de pendiente también se observa en la temperatura exterior y como es lógico influye en la temperatura del invernadero en régimen espontáneo. Este fenómeno observado también en el invernadero (III) se explica teniendo en cuenta que el lecho funciona cargando energía hasta los 18 horas y para ello toma aire caliente del espacio que hay entre las dos cubiertas e ingresa al mismo aire a temperatura ambiente exterior,

que a esa hora tiene un valor de 16 °C. Esto hace que la temperatura interior del invernadero descienda abruptamente debido al aumento de las pérdidas convectivas.

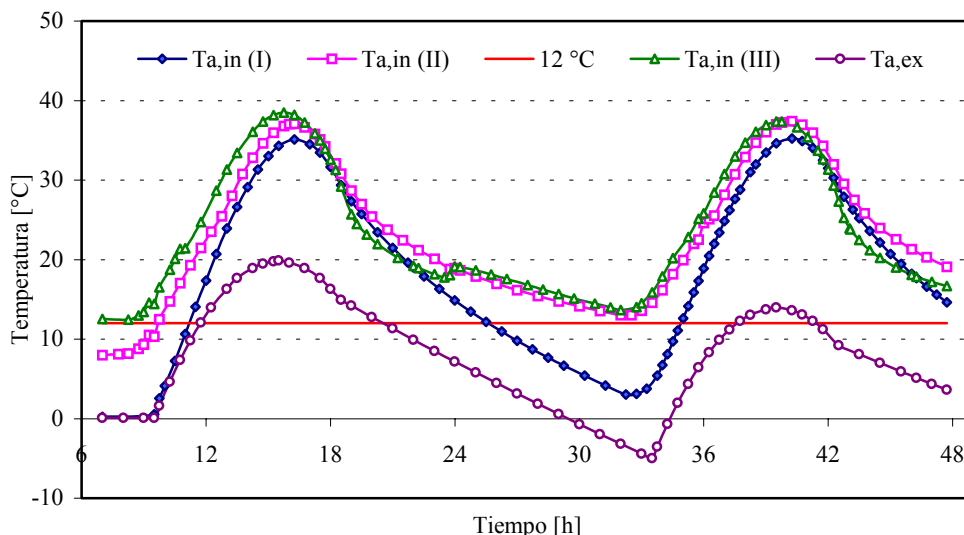


Figura N° 3. Variación de la temperatura en función del tiempo para los tres casos en contraste con el ambiente exterior

También es importante destacar que el relé utilizado para el corte del generador no abre y cierra instantáneamente sino que tiene un transitorio. Este comportamiento se debe a que en el programa de simulación, para evitar oscilaciones, se fijó entre 12 °C y 25°C el intervalo para el cual el relé [on-off] permite el paso de corriente. Así, la temperatura de 25 °C en el invernadero (III) se tiene a las 19:10 horas y a esa hora se inyecta el flujo de corriente que incluye el aporte solar; mientras que para el invernadero (II) esta temperatura se alcanza una hora después. Por otro lado se observa que a las 24 horas cuando comienza la descarga del lecho el flujo inyectado por el generador en el caso del invernadero con aporte solar es menor que el correspondiente al invernadero libre (II). En la figura 4 se observa el comportamiento de los flujos de corrientes JQL y JQX inyectados por el generador para los invernaderos (II) y (III) respectivamente. Como se aprecia analizando la variación del flujo JQL, el generador entre las 12:40 y las 20:10 horas no inyecta ningún flujo debido a que durante este periodo la temperatura es superior a 25 °C. A partir de esta hora y hasta las 9 horas del segundo día se inyecta flujo hasta alcanzar un valor máximo de 21 kW.

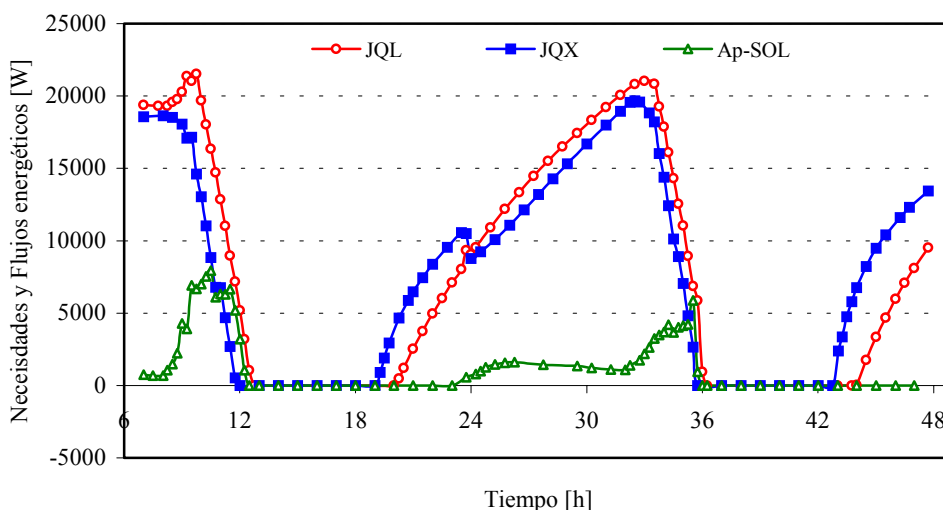


Figura N° 4. Flujos energéticos aportados por el generador en los casos I y III. Aporte neto solar

El flujo JQX muestra un comportamiento algo diferente. A las 19:10 horas y debido a que en ese momento para el invernadero (III) la temperatura llega a 25 °C, el generador comienza a inyectar calor. Como puede verse entre las 19 y 24 horas de ambos días el flujo JQX es superior al JQL. Esto se debe al fenómeno explicado anteriormente referido a la disminución abrupta de la temperatura en el interior del invernadero por el funcionamiento del lecho (carga) que obliga al generador a aportar un valor mayor de corriente para mantener la temperatura en el nivel fijado. A las 23:30 horas del primer día el valor del flujo es de 10,6kW. A las 24 horas comienza a funcionar el lecho en descarga lo que origina un descenso del flujo a 8,7 kW. A partir de esta hora y hasta las 8:30 horas del segundo día el generador aporta corriente hasta un valor de 19,7 kW. Como se ve durante este

período los valores de este flujo son inferiores a los JQL debido a los aportes solares, hecho que se visualiza en la figura si se tiene en cuenta la curva correspondiente al aporte solar (Ap-SOL).

En la figura 5 se muestran los aportes de cada uno de las componentes solares del sistema para los dos días del mes de julio. Se observa que el aporte de los colectores Norte (Ap del CN) y Sur (Ap del CS) durante el día son muy pequeño, correspondiendo a los valores positivos de las curvas. Sin embargo se advierte que el aporte del invernadero hacia los mismos colectores (Ap al CN y Ap al CS) es significativo durante ciertas horas del día, dependiendo de la temperatura de entrada del agua y de la radiación colectada. También se muestra el aporte del lecho de piedra (Ap del Acum) durante el período diurno de carga (10 h - 18 h), así como en el período nocturno de descarga entre las 23:30 horas y las 8:30 horas del día siguiente. El aporte durante la carga se debe a que el aire que sale del acumulador ingresa al invernadero en el nodo 5.

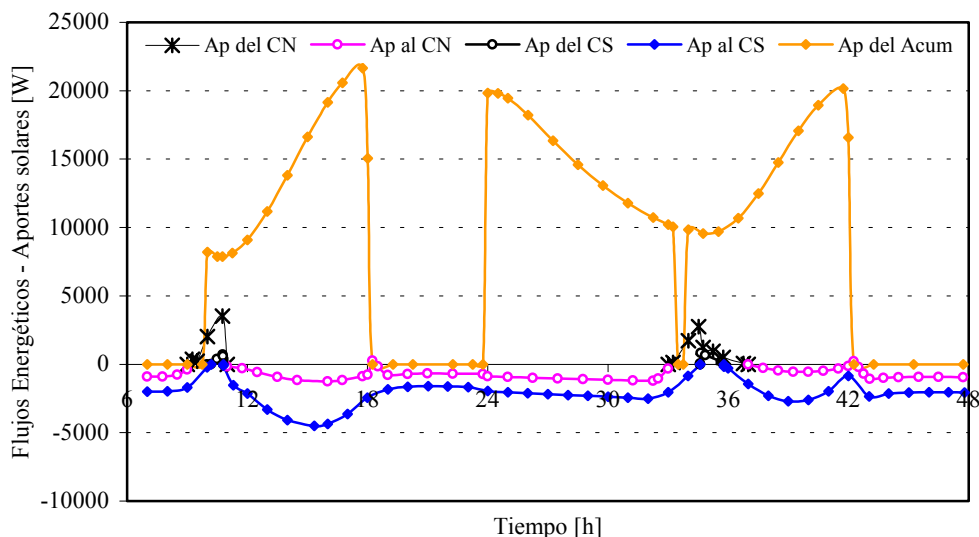


Figura N° 5. Flujos energéticos de los sistemas solares en estado activo y pasivo en el nodo 5.

Análisis de los flujos y requerimientos energéticos

En la Tabla 1 se muestran las temperaturas externas máximas y mínimas para los días más desfavorables de los meses de Abril a Setiembre de los últimos 20 años. Para esos mismos días se exhiben las temperaturas del ambiente interior al invernadero que resultan de la simulación para las tres situaciones analizadas (ver Fig. 3). Los H que figuran en la tabla son valores máximos; así Haux (JQXL) es el valor máximo necesario del flujo energético total para mantener la temperatura óptima dentro del invernadero (caso II) y Hc (JQX) es el máximo valor cuando el invernadero rusticadero tiene calefacción solar (caso III); Ec es la energía necesaria para la calefacción y Esol es la aportada por los sistemas solares. La fracción de uso diaria de la calefacción, fu, se calcula teniendo en cuenta las horas de uso del sistema de calefacción (hu) respecto de las 24 horas del día. Es necesario notar que el número de horas necesarias para la calefacción está influenciado por las características de los días anteriores al analizado. Así por ejemplo para el día 5 de junio (mínima - 1,8 °C) se necesitan 23 horas de funcionamiento de la calefacción mientras que para el 30 de julio (- 5,0 °C) 17 horas y para el 9 de agosto (mínima - 4,6 °C) 19 horas. Si se analiza los días anteriores, se ve que para el mes de junio las características climáticas de los mismos son las más desfavorables. En este sentido, a pesar de ser el mes de Julio el más desfavorable respecto de las condiciones externas, se advierte que el mes de Agosto es el que mayor requerimiento energético necesita (946 MJ). Las fracciones de energía solar aportada por los sistemas activos incorporados [Esol/Ec] corresponden a un mínimo de un 8 % para Agosto, 8,9 % para Junio, 11 % para Julio y 14,5 % para Abril. Este aporte depende especialmente de las condiciones de radiación del día seleccionado.

Mes (día)	Ta,ex [°C]		Ta,in (I) [°C]		Ta,in (II) [°C]		Ta,in (III) [°C]		Haux [kW]	Hc [kW]	Ec [MJ]	Esol [MJ]	hu [h]	fu
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.						
ABR (21)	4,5	25,5	9,2	36,8	14,8	38,2	15,6	36,9	12,8	10,9	619,3	90,1	12	0,51
MAY (31)	0,4	23,9	5,5	31,7	13,9	33,2	14,7	32,8	17,6	16,2	639,7	84,5	18	0,75
JUN (15)	-1,8	16,6	2,5	24,3	12,6	26,1	13,1	26,5	20,1	19,3	935,0	84,0	23	0,96
JUL (30)	-5,0	14,0	3,0	35,2	12,9	37,4	13,5	37,4	21,1	16,7	700,2	81,4	17	0,73
AGO (09)	-4,6	26,2	0,0	30,7	12,0	33,8	12,1	34,0	23,2	22,4	946,3	75,9	19	0,79
SET (15)	1,4	21,7	5,6	41,8	14,1	43,7	14,8	42,1	16,9	15,7	667,9	68,2	16	0,68

Tabla 1. Condiciones externas e internas, flujos y requerimientos energéticos - Resultados de la simulación

En la Tabla 2 se presentan para los meses de análisis y para los sistemas solares asociados al invernadero rusticadero los resultados de la simulación. En el caso de los colectores Norte y Sur, Hi representa el flujo máximo que éstos intercambian con el

invernadero, Ha el flujo que dichos colectores absorben desde el interior del invernadero y Ei y Ea las energías intercambiadas y absorbidas respectivamente.

El flujo máximo aportado por el acumulador de piedra es Hap y Eap la energía diaria entregada al invernadero en el nodo 5. Es de notar que el aporte energético del lecho de piedra es mayor que las necesidades térmicas debido a que en el cálculo se incluye, además del calor que se suministra durante el periodo nocturno, la energía que se entrega durante el día por la recirculación del aire a través del mismo. Este excedente se eliminaría si se aumenta la capacidad del lecho. El aporte solar máximo diario Hs, se calculó como la diferencia entre los flujos incorporados por el generador para la calefacción del invernadero en el caso II y III (JQXL - JQX).

Mes	Colector Norte				Colector Sur				Acumulador		Aporte solar
	Hi [kW]	Ei [MJ]	Ha [kW]	Ea [MJ]	Hi [kW]	Ei [MJ]	Ha [kW]	Ea [MJ]	Hap [kW]	Eap [MJ]	Hs [kW]
ABR	0,7	4,2	1,3	37,3	1,5	8,0	3,7	106,4	24,5	931,8	3,3
MAY	0,7	7,1	0,9	45,5	1,7	11,0	2,2	119,0	21,6	846,3	2,7
JUN	0,5	3,2	1,0	50,9	1,1	3,8	2,2	124,4	17,8	713,3	2,3
JUL	2,9	10,8	1,2	54,7	0,8	1,7	2,7	158,8	21,7	924,0	6,1
AGO	0,2	0,2	1,2	59,0	0,0	0,0	3,6	155,8	17,8	666,3	7,1
SET	1,7	4,7	1,7	80,4	0,0	0,0	5,4	223,2	13,2	953,8	5,3

Tabla 2. Intercambio de flujos entre el ambiente interior y los sistemas solares - Resultados de la simulación

CONCLUSIONES

El modelo análogo eléctrico - térmico con generador externo permite calcular las necesidades energéticas de los invernaderos de una manera sencilla, determinar los flujos de calor y masa que intervienen en el proceso de transferencia y las energías de los sistemas solares activos y pasivos incorporados al invernadero. El conocimiento de estos parámetros permite dimensionar tanto el invernadero como los equipos calefacción apropiados al mismos. También permite determinar los excedentes de energía (pérdidas) del invernadero y los sectores donde ocurren.

Si bien en esta simulación solamente se han utilizado los valores de las temperaturas mínimas absolutas de los últimos 20 años, es conveniente extender el análisis a todos los días de cada mes seleccionado, para tener una visión más completa del comportamiento térmico del invernadero y calcular la energía diaria necesaria para mantener la temperatura óptima. También es necesario realizar algunos ajuste en el programa para mejorar la precisión en el corte del generador cuando las temperaturas superan los valores de referencia, evitando que el modelo entre en oscilaciones on - off.

REFERENCIAS

- Avisar R. y Mahrer Y. (1982). Verification study of a numerical greenhouse microclimate model. Trans. ASAE 25, 1711- 1720.
- Becker D. (1998). Extended SCEPTRE User's manual.
- Flores S. (2003). Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta.
- Iriarte A. (1996). Calefacción de invernaderos utilizando biomasa residual agrícola. Tesis de Magister, U.I. de Andalucía.
- Iriarte A., García V., Bistoni S., Saravia L., Matias C. y Tomalino L., (2000). Comportamiento térmico y energético de un "invernadero rusticadero solar". Avances en energías renovables y medio ambiente, Vol. 4, N° 1, pág. 02.51 - 02.56.
- Iriarte A. (2001). Acondicionamiento término solar de invernaderos para la producción agrícola intensiva. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta.
- Levit H. y Gaspar R. (1988). Energy budget for greenhouses in humid- template climate.
- Saravia L. y Saravia D. 2000. Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. Avances Energías Renovables, Vol. 4, pp. 8.17 - 8.23.
- Selcuk M. (1971). Analysis design and performance evaluation of controlled environment greenhouses. Trans. ASHRAE, 2172.
- Takani S. y Uchijima Z. (1977). A model for greenhouse environment as affected by the mass and energy exchange of crop. Journal Agric. Meteorol. Vol. 33, pág. 117-127.
- Takakura, T., Jordan, K and Boyd, L. (1971). Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. Transactions of the ASAE 14(5), 964 - 971.
- Walker J. (1965). Predicting temperatures in ventilated greenhouses. Trans ASAE Vol. 8, pág. 445-448.

ABSTRACT The knowledge of thermal balance of a greenhouse including all components allows to determine the necessary energetic flow to maintain environmental conditions adequate to cultivation. In steady state it is easy to calculate the flow; but its determination in transient state is more difficult. In the present paper, a method to calculate these requirements is described treating the thermal problem as an electric one. An electric current generator is connected to a circuit node representing the air temperature in the greenhouse. The value of this electric current is determined according to the thermal losses. The model permits to show the solar energy contributions of all components. Results from April to September are analyzed and those showing the most unfavorable day of July in the last 20 years are described.

Key words: greenhouses, thermal - electric model, solar heating, thermal losses.