

INVERNADERO CON ACONDICIONAMIENTO TERMICO SOLAR: MODELIZACION CON SIMUSOL

Suárez, H.^{1,2}

¹Universidad Nacional de Salta (UNSa)

²Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)-Av. Bolivia 5150 C.P.4400 - Salta
 Tel. 0387-4255389 e-mail: galossuarez@gmail.com

Recibido: 15/08/12; Aceptado: 25/09/12

RESUMEN: La cuantificación de los procesos físicos fundamentales que describen la respuesta dinámica del clima del invernadero- con acondicionamiento térmico solar- a las condiciones externas y su integración en un modelo físico dinámico, es una herramienta fundamental en el diseño del mismo, permitiendo mejorar su eficiencia y predecir las características micro climáticas de futuras instalaciones. La resolución del modelo se realiza mediante el programa SIMUSOL, que utiliza la analogía eléctrica-térmica para resolver numéricamente los circuitos utilizando el programa SCEPTRE. Los resultados obtenidos de las variables climáticas, en condiciones de clima desfavorable, muestran una buena correlación entre los datos experimentales y simulados mostrando la eficiencia del sistema de acondicionamiento activo de captación de energía solar y acumulación.

Palabras clave: Invernadero, simulación, SIMUSOL.

INTRODUCCIÓN

El control del microclima en invernaderos posibilita el desarrollo óptimo de las plantas, su control sanitario y un mas intensivo uso del suelo, así también se puede mejorar la calidad del producto y la posibilidad de producir en el momento oportuno de alta exigencia del mercado. El cultivo mediante el uso de invernaderos en los valles templados de Salta necesita de calefacción en algunos días de invierno en que las temperaturas mínimas alcanzan los -5 a -8C. Por otro lado son frecuentes los días de alta radiación que dan lugar a un recalentamiento del invernadero, aun en invierno. Para mejorar la eficiencia y reducir las cantidades de energía convencional necesaria para el funcionamiento del invernadero, los procesos que afectan su microclima deben ser detectados y analizados. Si el clima del invernadero puede ser predicho como función de su estructura y las condiciones atmosféricas, se podrá elegir entre varias posibilidades y antes de realizar la experimentación hortícola, saber como el rendimiento y la calidad del cultivo será afectada. Los modelos numéricos son muy útiles para este propósito (Levit y Gaspar, 1988).

Se realizo una modelización física de la dinámica de funcionamiento del invernadero representando el comportamiento de las variables que describen el microclima del mismo. Para realizar la simulación se aplico el programa SIMUSOL y SCEPTRE en Linux, este permite acoplar las distintas partes del sistema y realizar un balance térmico- energético integral del mismo (Saravia y Saravia, 2000). Posteriormente se procede a comparar las medidas experimentales y las simuladas con SIMUSOL.

MATERIALES Y METODO

El invernadero ensayado (fig 1) cuenta con un sistema activo de captación de energía solar y acumulación. Un quemador de desechos agrícolas o leña provee la energía auxiliar para la calefacción cuando la radiación solar no es suficiente. Detalles de la envergadura y componentes del mismo se encuentran en Saravia et al, 1994.

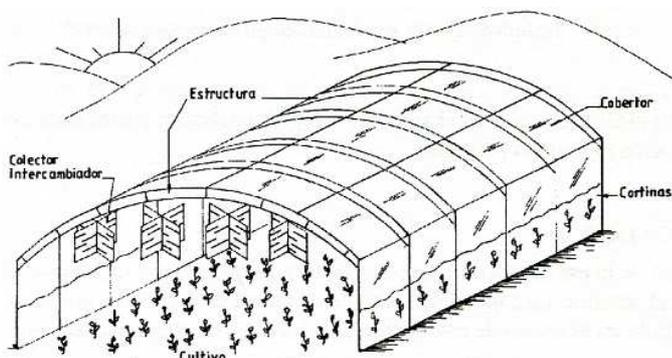


Fig 1: Estructura y componentes del invernadero ensayado.

La estructura del macro túnel está formada por arcos semicirculares, columnas y piezas longitudinales, todo en caño estructural de acero. El desarrollo de cada arco es de 8 m para un aprovechamiento integral del polietileno LDT de 9 m de ancho. Posee cortinas laterales fijas a la estructura por su lado superior y pueden levantarse para ventilación mecánicamente.

El sistema colector-intercambiador está constituido con bolsas de polietileno, con soldaduras en forma de zig-zag, que se colocan en el interior del invernadero, colgadas a la estructura. El agua ingresa por la parte superior y por gravedad es recogida y se hace circular hasta un depósito acumulador. Una bomba eléctrica succiona el agua del depósito y la envía a la red primaria de distribución cerrando el circuito. Desde el punto de vista operativo el sistema demostró ser seguro, trabaja la temporada sin interrupciones, no se observaron degradación de bolsas ni filtraciones. El peso de agua lo hace resistente en días donde el viento es fuerte. Necesita control químico de algas en el acumulador para evitar obstrucciones del flujo de agua.

La toma de datos se realizó con plaquetas de adquisición de datos PC-LAB 812 de MICROTEK con interfaces de acondicionamiento de datos provenientes de sensores de temperatura (NTC 2000 de MURATA), humedad (HMP 35D de VAISALA), velocidad de viento (anemómetro SVI de BAPT) y de radiación solar (solarímetros KIPP & ZONNEN).

El programa de simulación utilizado es el SIMUSOL (entorno Linux), se basa en dos programas, el SCEPTRE que resuelve las ecuaciones que describen un circuito en estado transitorio y el DIA que permite graficar los mismos. El SIMUSOL trabaja en base a la analogía entre los circuitos eléctricos y térmicos. Los sistemas deben estar formados por elementos concentrados, lo que significa que dicho sistema deberá quedar definido por un número finito de temperaturas, los elementos estarán en contacto con pares de temperaturas y transmiten energía. SIMUSOL trabaja en dos pasos, primeramente se dibuja el circuito del sistema usando el programa DIA, donde además a través de cuadros de datos, iniciales, controles, resultados y gráficos se introducen los elementos del circuito, sus valores, el método de integración, las condiciones de borde e iniciales y se solicita los resultados deseados en tablas o gráficos (Saravia y Saravia, 2000).

EL MODELO

El invernadero es considerado como un sistema de cinco capas homogéneas: Cobertor, sistema colector- intercambiador, aire interno, plantas y suelo. El modelo consiste en una serie de ecuaciones diferenciales-unidimensionales de primer orden acopladas. Estas pueden ser representadas a través de una notación gráfica en la cual el enlace entre las ecuaciones y los flujos de calor y vapor de agua pueden ser reconocidos (Suarez y Saravia, 1997).

Considerando que para el periodo de simulación las ventanas están cerradas y solo hay renovaciones de aire por infiltraciones, entonces los gradientes horizontales son pequeños y se supone homogeneidad para el aire (no es así en sentido vertical). Para las hojas y bolsas colectoras- intercambiadoras, si bien la distribución de radiación no es uniforme, asignamos una temperatura promedio para cada una de estas capas. En el suelo, teniendo en cuenta que el invernadero es grande y el suelo uniforme, los flujos de calor son mayormente verticales permitiendo dividirlo en capas horizontales cada una de las cuales tiene una temperatura uniforme. El cobertor, al ser de pequeño espesor, se lo considera que tiene una temperatura homogénea.

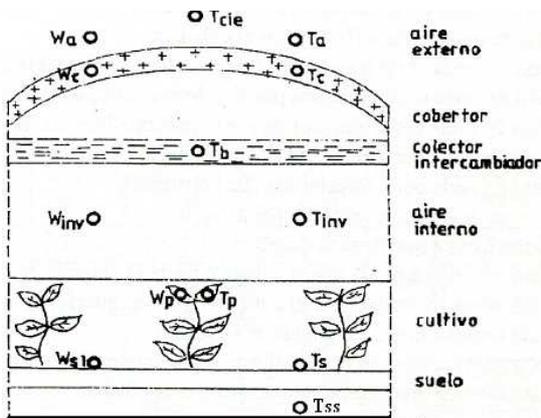


Fig 2: Compartimientos del modelo y variables climáticas.

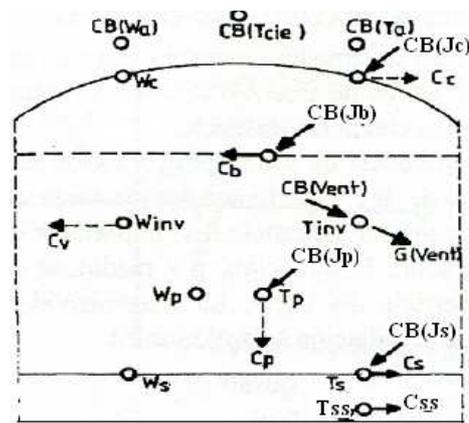


Fig 3: Condiciones de borde. Irradiación, ventilación, acumulación de energía y vapor.

La figura 2 representa los compartimientos de modelo junto con los puntos nodales involucrados en los procesos de transferencia de calor y masa. La figura 3 ilustra las condiciones de borde (CB) por radiación solar (J), temperatura ambiente (Ta) y velocidad de viento (v_w).

Modelo térmico convectivo y conductivo.

Entre las distintas componentes del invernadero hay intercambios de energía por el mecanismo de convección o conducción, los cuales son representados por sus coeficientes de transferencia convectivos y conductivos. El modelo permite determinar las temperaturas del cobertor (Tc), las bolsas colectoras intercambiadoras (Tb), las hojas del cultivo (Tp) y la superficie del suelo (Ts). El proceso de intercambio de energía debido al flujo de masa desde el colector intercambiador hasta el acumulador (Jbac) y su recíproco (Jacb) son tenidos en cuenta y se observan en el diagrama DIA de la figura 4. También se tienen en cuenta los intercambios energéticos debido a ventilación (Jainv y Jinva). En la simulación, debido a las condiciones

desfavorables de temperatura ambiente, las ventanas permanecieron cerradas y el intercambio de masa se debe solo a infiltraciones. La irradiación solar sobre los distintos componentes del sistema es una condición de borde que también se indica en el diagrama.

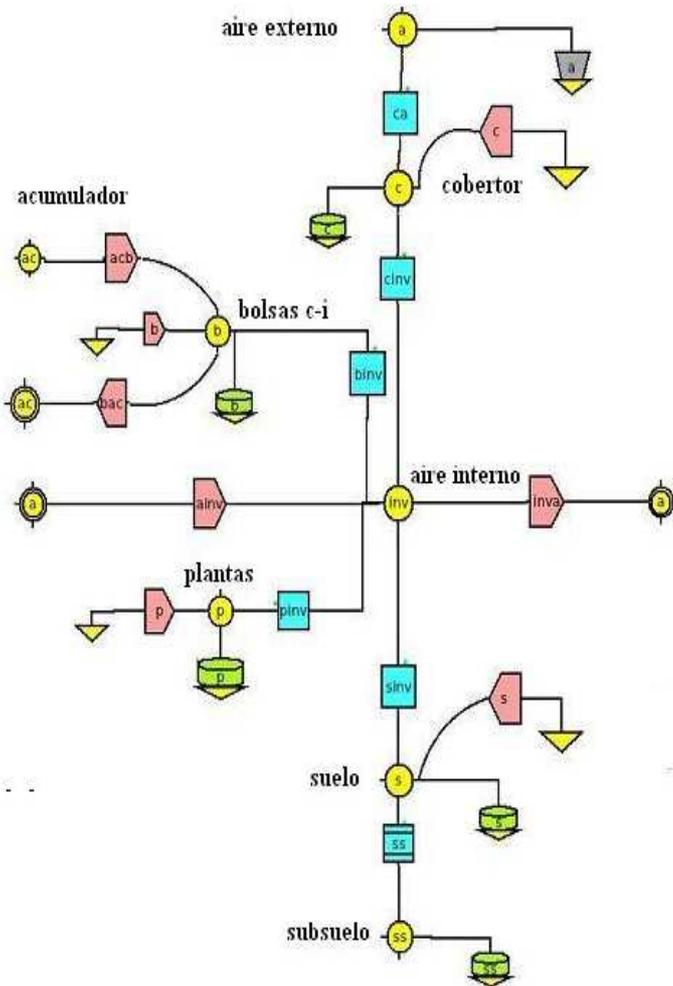


Fig.4:Diagrama DIA correspondiente al modelo térmico convectivo y conductivo del invernadero.

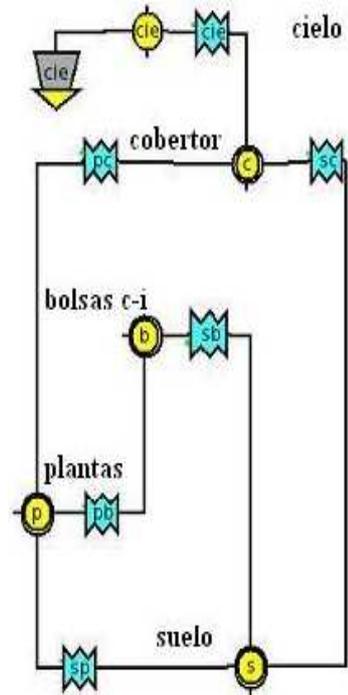


Fig.5:Diagrama DIA correspondiente al modelo radiativo del invernadero.

Modelo térmico radiativo.

Las componentes opacas del invernadero intercambian energía por radiación térmica. Su representación gráfica a través de una red térmica se muestra en la figura 5. La temperatura del cielo (T_{cie}) es una condición de borde. Los coeficientes de transferencia de calor por radiación térmica incluyen los coeficientes de emisión de superficies, los factores de vista entre una y otra superficie y el área de la primera superficie (Duffie-Beckman, 1991). Es importante determinar la estructura del follaje, por su impacto sobre la radiación, por medio de los factores de vista de la vegetación y de la superficie del suelo. La transmisividad del cultivo es útil para conocer la distribución de la radiación solar y térmica.

Modelo integral del acumulador

El agua caliente que sale de las bolsas colectoras-intercambiadoras se acumula en un depósito excavado en el suelo, recubierto con plástico negro, aislado térmicamente y con una cubierta de plástico transparente para captar radiación solar. Durante la noche, el agua tibia vuelve a circular por las bolsas para calentar el invernadero. El depósito acumulador se muestra en la figura 6, donde además se indican los flujos de energía.

La construcción de este depósito se realiza cubriendo la fosa con polietileno expandido (tergopol) de 5 cm de espesor y luego cubriendo todo con polietileno negro y dejando los bordes sobre elevados unos 20 cm, constituyendo así una piscina contenedora de agua. Finalmente un film de polietileno de calidad UV de 150 micrómetros de espesor va apoyado sobre arcos a unos 50 a 70 cm de altura y cumple la función de cobertor del depósito. El cobertor es tensado desde los bordes y luego estos son enterrados.

El depósito absorbe calor debido al aporte de las bolsas colectoras y por radiación que ingresa a través de la cubierta plástica. Las pérdidas de calor son fundamentalmente debidas a radiación hacia el cobertor y por conducción al suelo. En esta

simulación, para el acumulador, se supone que la temperatura del cobertor es igual que la temperatura ambiente, lo que simplifica el modelo.

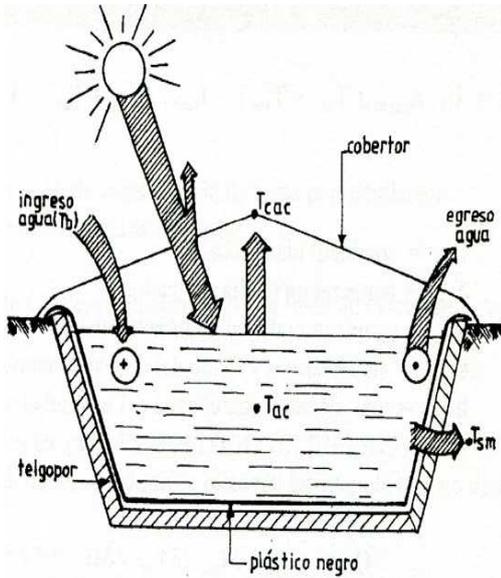


Fig 6: El depósito acumulador, componentes y variables climáticas.

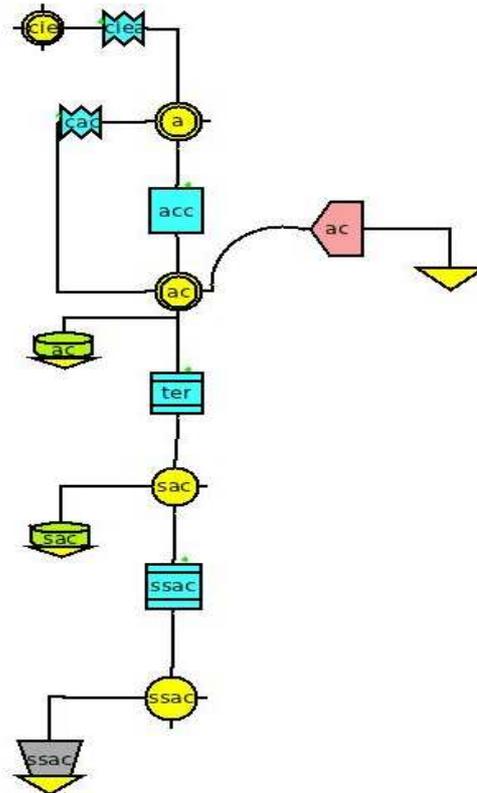


Fig 7: Diagrama DIA para el modelo térmico del depósito acumulador.

SIMULACION Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se analizarán los resultados de medidas simuladas en contraste con las experimentales. La simulación se realizó para un día en que hubo temperaturas extremadamente bajas para esta región y así poder observar el efecto del sistema colector-intercambiador sobre el clima del invernadero.

Condiciones climáticas externas

La irradiación global para el día de la simulación (18/7/92) se muestra en la figura 8. La simulación se lleva a cabo por un periodo de 24 horas, iniciando la misma a partir de las 19:30 horas, cuando comienza a anochecer y hasta las 19:30 horas del día siguiente. Este día invernal era de cielo claro, salvo un corto periodo de tiempo donde la radiación disminuye por nubosidad. La máxima radiación global para ese día fue de 780 W/m². A partir de las propiedades físicas de las componentes del invernadero, la radiación incidente, las radiaciones totales absorbidas por el cobertor, el colector intercambiador, las plantas y el suelo pueden ser calculadas y se exponen en la figura 8.

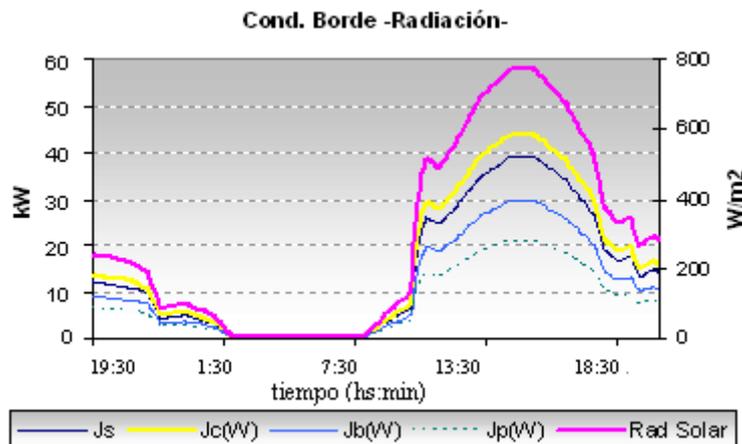


Fig 8: Radiación externa y radiaciones totales absorbidas por cobertor (Jc), bolsas colectoras -intercambiadoras (Jb), la plantas (Jp) y el suelo (Js).

La radiación externa se grafica en el eje *Y secundario* en unidades de W/m^2 , mientras que las totales en el eje *Y principal* y sus unidad es el kilovatios (kW). Una primera observación nos dice que el sistema colector-intercambiador no disminuye apreciablemente la cantidad de radiación sobre las plantas.

La temperatura ambiente (de bulbo seco) se representa en la figura 9, muestran un valor mínimo de -6 C a hs. 07:00 y no superior a 20 C a hs 14:00. La temperatura de cielo es calculada para día claro y es aproximadamente inferior en 18 C a la temperatura ambiente durante la noche, llegando a valores pico de -25 C . en el día esta diferencia disminuye obteniéndose una T_{cie} máxima de 4 C aproximadamente. La velocidad de viento durante la noche se mantiene constante en aproximadamente 1 m/s mientras que la humedad relativa alcanza valores máximos (100%). Durante el día, la primera tiene algunos picos que no superan los 1.6 m/s y la segunda desciende hasta el 35% aproximadamente. En el interior del suelo existen flujos de calor, pero se anulan a partir de los 50 cm de profundidad pudiendo tomarse esto como una condición de borde para la temperatura de subsuelo.

Simulación y resultados experimentales

Se realizo la simulación en SIMUSOL, con los datos de estructura, propiedades físicas y las condiciones climáticas externas ya mencionadas con anterioridad. A continuación se presentan los resultados obtenidos, los cuales se representan con sus homólogos experimentales para un mejor contraste y análisis.

Las temperaturas simuladas y medidas del aire del invernadero se presentan en la figura 9. En la misma gráfica también se observa, a modo de referencia, la temperatura ambiente. Se observa que en general existe un buen acuerdo entre lo simulado y lo medido. Luego de la medianoche y a primeras horas del día el acuerdo es óptimo. En la hora pico de temperatura, la real excede a la simulada y al finalizar el día esto se invierte. Comparando con la temperatura ambiente se puede ver el efecto del sistema colector-intercambiador manteniendo la temperatura del invernadero por sobre el punto crítico de riesgo para el cultivo.

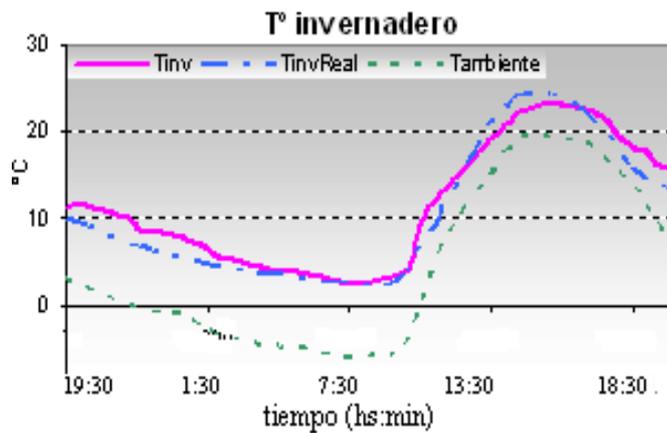


Fig 9: Temperaturas simulada y real del aire del invernadero contrastadas con la temperatura ambiente.

La dinámica del sistema colector-intercambiador-acumulador para el control del clima del invernadero y la buena aproximación del modelo desarrollado se refleja en las figura 10. Se observa un muy buen acuerdo entre las temperaturas del acumulador medidas y las simuladas con SIMUSOL. La curva muestra el comportamiento típico de un acumulador. Durante la noche y primeras de la mañana descarga calor en el invernadero sufriendo un descenso de su temperatura de aproximadamente 7 C . En el día, cuando la irradiación solar es suficiente, acumula calor ascendiendo su temperatura hasta niveles que le permiten reiniciar el ciclo de control del clima del invernadero. Contrastando los valores simulados con los medidos se ve que en las primeras horas de la noche la temperatura simulada es levemente inferior a la real, luego esto se invierte y permanece así durante la mañana. Durante el resto del día la simulación es óptima.

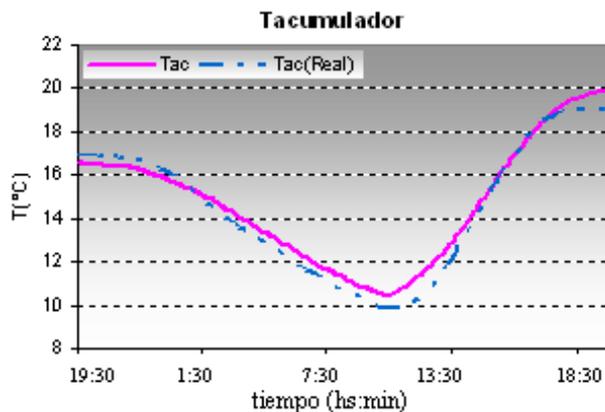


Fig 10: Temperaturas simulada y real del acumulador.

La respuesta a la irradiación solar de las temperaturas del invernadero, cobertor y plantas es fuerte. Menor es la influencia sobre la temperatura del suelo y capas internas del mismo. Las temperaturas en la superficie del suelo simulada y medida se muestran en la figura 11. Durante la noche la temperatura del suelo es mayor que la del invernadero, durante el día esta relación se invierte. Estas variaciones de temperatura se traducen en flujos de energía que favorecen al clima del invernadero.

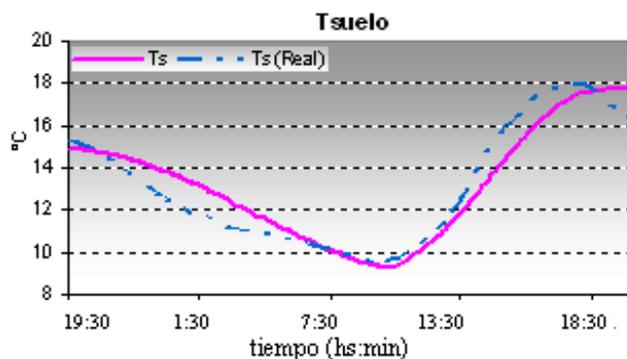


Fig 11: Temperaturas simulada y real de la superficie del suelo.

Flujos de calor y masa

La simulación desarrollada permite conocer y representar todos los flujos de energía y masa (vapor de agua) en el sistema. Los flujos de masa se deben a transpiración de las plantas, evaporación del suelo, condensación en el cobertor y el intercambio por ventilación; siendo importantes algunos mas de noche y otros durante el día. Los flujos de calor se dan por los mecanismos de convección, conducción y radiación entre los diferentes componentes del invernadero. En la simulación con SIMUSOL todas las cantidades de esas magnitudes pueden obtenerse, pero como el objetivo de este trabajo es la validación del modelo y simulación realizada, no se profundiza en ello en este análisis, comparando solamente los valores simulados con los medidos experimentalmente.

CONCLUSIONES

El análisis de los balances de energía sobre la vegetación, suelo, sistema colector-intercambiador y acumulador permite obtener información detallada del clima del invernadero. Se verifico la capacidad de SIMUSOL para diagramar el modelo físico dinámico del clima del invernadero como un circuito térmico equivalente y para resolver las ecuaciones diferenciales que lo describen. Los diagramas DIA son sencillos de implementar y resultan muy didácticos para visualizar las relaciones entre las variables del modelo. Además la posibilidad de incorporar módulos simplifica la simulación.

Se obtuvieron buenas correlaciones entre los datos medidos y los simulados. SIMUSOL permite indagar de manera rápida y sencilla los efectos de la variación de parámetros en los resultados de la simulación, por lo que se constituye en una herramienta importante para el diseño de distintos sistema.

REFERENCIAS

- Saravia L. y Saravia D. (2000) "Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de calculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad". AVERMA, Vol. 4, pp8.17-8.23.
- Saravia L y colaboradores. (1994) "Diseño y construcción de un sistema integrado Invernadero-Secador con calentamiento combinado solar y biomasa". INENCO. CIUNSa. Salta.
- Levit H y Gaspar R."Energy budget from greenhouse in humid-temperate". Agricultural and Forest Meteorology, Elsevier Science Publisher B.V, Amsterdam, 1988.
- Iriarte A., Gea M.,García V. y Placo C. "Simulación numérica de una cámara bioclimática para microinjección de plantines de nogal".AVERMA, Vol 10. pp 08.31-pp 08.38.2006
- Suárez, H y Saravia L "Balance energético del funcionamiento de un invernadero con acondicionamiento térmico solar. Modelización y ensayos". AVERMA Vol 1, pp 13-pp16. 1997.
- Duffie-Beckman. "Solar Engineering of Thermal Processes". Wiley.N.Y.1991.

ABSTRACT

The quantification of the fundamental physical processes that describe the dynamic response of greenhouse climate, with solar-thermal conditioning to external conditions and their integration into a dynamic physical model is a fundamental tool in the design of it, thus improving efficiency and microclimatic characteristics predict future facilities. The resolution of the model is accomplished by SIMUSOL program, which uses the thermal-electrical analogy to numerically solve the circuits using the SCEPTRE program. The results of climatic variables, in unfavorable weather conditions, show a good correlation between simulated and experimental data showing the efficiency of active conditioning solar energy collection and accumulation.

Keywords: Greenhouse, simulation, SIMUSOL