

SIMULACION DE SECADEROS SOLARES DE CONVECCION FORZADA

L. Zunino* y L. Saravia**

INENCO+
Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177
4400 Salta - Argentina

RESUMEN

Se modeliza un sistema de secado solar de productos agrícolas de los de tipo secadero-invernadero. La técnica utilizada es la de simulación modular y por ello el modelo puede utilizarse para secaderos solares en general. Se describe el sistema y el modelo en forma general, se plantea la resolución y se muestran los resultados obtenidos y las conclusiones.

INTRODUCCION

En este trabajo se modeliza un sistema de secado solar de productos agrícolas que consiste en un invernadero de plástico diseñado para permitir su utilización durante el verano como secadero y el resto del año para cultivo.

Se usó la técnica de simulación modular que por su ductilidad permite aplicar el modelo al estudio de secaderos en general.

El trabajo se dividió en tres partes a saber:

En la parte I, se describe en forma general el sistema de secadero solar de tipo invernadero y el modelo computacional.

En la parte II se desarrolla el método que se usó para resolver las ecuaciones que resultan de plantear los balances de energía y de masa entre los elementos del sistema.

En la parte III se muestran los resultados obtenidos y las conclusiones.

PARTE I - DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA DE SECADERO SOLAR DE TIPO INVERNADERO Y DEL MODELO COMPUTACIONAL

La figura 1 muestra esquemas del sistema en sus configuraciones como secadero y como invernadero. Está formado por una cubierta y un ventilador para el movimiento de aire.

* Becaria CONICET

**Investigador CONICET

+ Instituto UNSA- CONICET

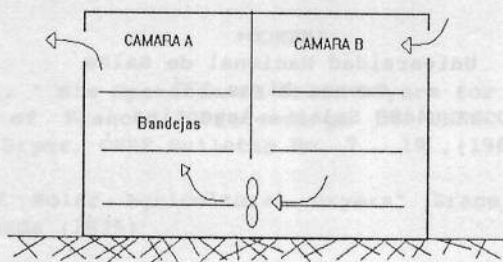


Fig. 1 : Esquema del secador - invernadero con cámara doble

Para el trabajo como secadero, la carpa es dividida en dos secciones mediante un plástico. En cada una se colocan bandejas ambos lados, dejando un corredor central.

El aire fresco entra directamente a la semicámara, con el producto mas seco, se calienta con poca incorporación de agua y pasa a la semicámara con material húmedo, para recoger humedad y salir al exterior. La figura 2 muestra la evolución del aire en un diagrama psicrométrico. La circulación de aire entre las dos semicámaras es mantenida por ventiladores axiales.

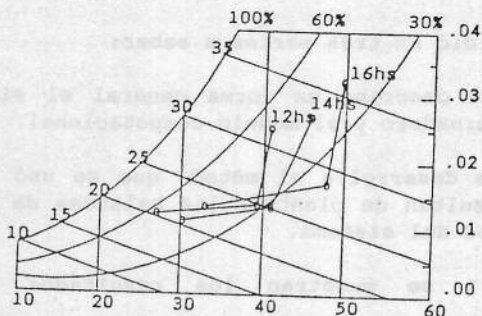


Fig 2 : Evolución del aire en un diagrama psicrométrico

En el funcionamiento como invernadero, se retiran la división central, las bandejas y los ventiladores, quedando la cámara libre para el cultivo.

La mayoría de los métodos existentes (1,4), están basados en el balance de energía, que consiste en dividir el sistema en diferentes elementos modelando los flujos de calor y de masa entre ellos y generando así las ecuaciones de balance. La solución del sistema de ecuaciones algebraicas resultante da los valores de la temperatura y la humedad del aire dentro de la cámara.

En todos estos modelos está implícita la suposición de que el único elemento que acumula calor es el piso y que la capacidad de

acumulación del resto del sistema es despreciable frente al monto diario de energía, por lo tanto el resto del sistema se ajusta inmediatamente a los cambios en las condiciones meteorológicas externas, de modo que pueden usarse las ecuaciones de estado estacionario.

Para predecir la evolución temporal de las condiciones en el sistema, se introducen en el modelo únicamente condiciones de borde primarias (temperatura ambiente y radiación incidente externas). Para la simulación del ambiente interno por el método de balance de energía, se ha dividido el sistema en cuatro elementos: suelo, aire interno, producto y cubierta y se modelan los flujos de calor y de masa entre ellos. El modelo contempla la posibilidad de que haya dos tipos de cubiertas, por ello se incluye un módulo para cubiertas de tipo aislante que suelen colocarse al sur en los secadero-invernaderos, o bien ser el único tipo de cubierta en los secaderos tipo túnel.

El problema puede considerarse unidimensional porque incluye solamente la variación con la profundidad de la temperatura del suelo y porque considera que las propiedades del producto y del aire interior son uniformes en el espacio. Se desprecia la acumulación de calor en el producto, aire interno y cubiertas, como así también la acumulación de humedad en el aire interno, porque la capacidad de acumulación de estos elementos es pequeña frente a los flujos existentes. Solamente se incluye la acumulación de calor en el piso, por lo cual este elemento es el que introduce los retardos en la respuesta del sistema a los cambios en las condiciones externas, sin embargo si la relación de llenado del secadero es grande, sería necesario incluir la acumulación de calor en el producto.

Para resolver el sistema de ecuaciones resultante, se dan las siguientes condiciones de borde que se especifican en función del tiempo : temperatura exterior T_o , humedad relativa exterior W_o y Radiación solar S_o .

La figura 3 muestra esquemáticamente los flujos de calor y de masa existentes en el secadero y que luego son usados para generar las ecuaciones de balance para cada elemento.

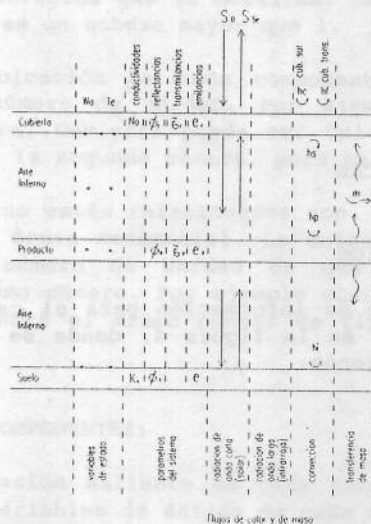


Figura 3.

PARTE II - RESOLUCION

II.1 PROGRAMA MODULAR

Las ecuaciones de balance de energía y de masa entre los elementos que componen el secadero, forman un sistema que debe resolverse, para ello se planteó un programa modular con la filosofía de trabajo de TRNSYS (2), es decir con módulos independientes cuyas conexiones mutuas se realizan en un módulo principal y son especificadas por el usuario.

El programa se llama SIMSEC y está escrito en Quick Basic 4.0.

Cada módulo representa un elemento del sistema (aire interior, suelo, cubiertas y producto) o bien elementos utilitarios del programa (lector de datos, procesador de radiación, impresión de resultados, operaciones algebraicas).

La técnica de simulación modular, reduce la complejidad del sistema. En esencia, un problema grande se transforma en varios problemas pequeños, que se resuelven independientemente.

Su estructura permite además mucha flexibilidad, ya que desde el punto de vista de la programación es relativamente fácil adaptarlo a un nuevo sistema físico, como sería el caso del funcionamiento como invernadero o la reestructuración de algún componente.

Por dicha flexibilidad y su relativa facilidad de manejo, es que resulta particularmente apto para su uso en diseño de sistemas mixtos adicionando las componentes para el funcionamiento como invernadero.

II.2 - CARACTERISTICAS DE LOS MODULOS

a) DIAGRAMA DE FLUJO DE INFORMACION

El diagrama de flujo de información es una representación esquemática del flujo de información entrante y saliente de cada uno de los componentes del sistema.

Los módulos componentes del sistema son:

SUELO
AIRE INTERNO
PRODUCTO
CUBIERTA
CUBIERTA SUR
OPERACIONES ALGEBRAICAS
LECTOR DE DATOS
IMPRESOR
PROCESADOR DE RADIACION

El diagrama de flujo de información para el caso de dos cámaras, con producto, se muestra en la figura 4, donde se han indicado solamente algunas de las conexiones.

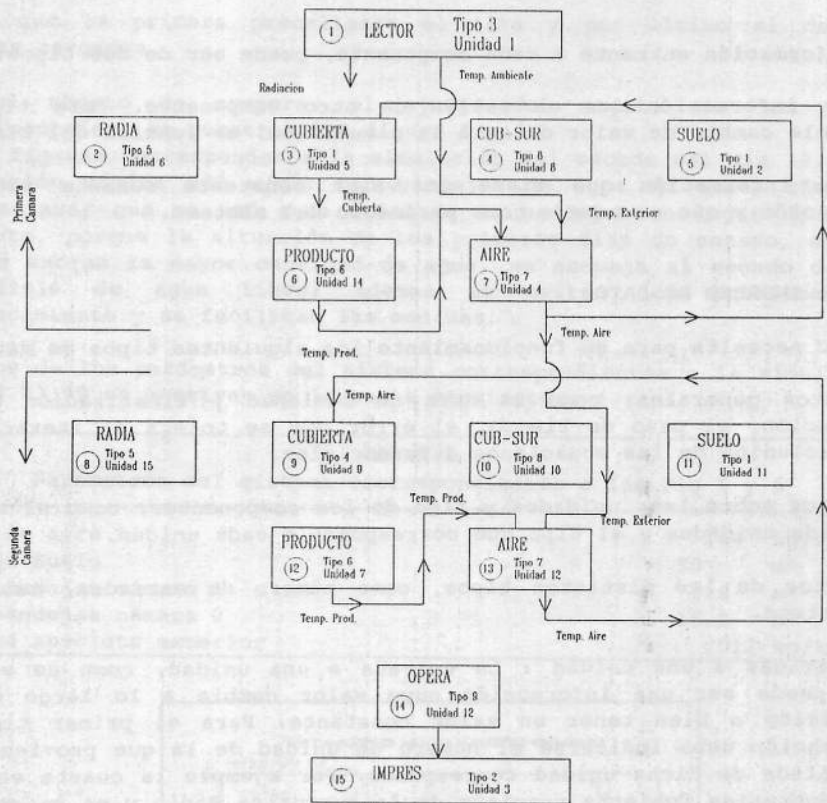


Figura 4.

b) NUMERO DE TIPO Y DE UNIDAD DE CADA COMPONENTE

SIMSEC identifica los distintos tipos de componentes por un número. Por ejemplo el elemento suelo, está modelizado por un módulo cuya subrutina se llama tambien suelo y es de tipo 1.

La relación entre un componente y su número de Tipo está determinada por el nombre de la subrutina que lo modeliza. Cada subrutina tiene el nombre Tipo n donde n es un entero mayor que 1.

SIMSEC reconoce la ubicación de cada componente en el diagrama de flujo por un único número de unidad. Por ejemplo si se simula un sistema de doble cámara, Cubierta puede ser Unidad 5 para la primera cámara y Unidad 9 para la segunda cámara, pero su tipo es 4.

Los números de Unidad no están relacionados con los números de Tipo y no necesitan estar en orden secuencial. La única restricción impuesta a la selección del número de Unidad es que no puede haber dos componentes con el mismo número. Por ejemplo cuando una componente del sistema se repite, tendrá el mismo número de Tipo, pero el de unidad es diferente.

c) PARÁMETROS DE LOS COMPONENTES:

El conjunto de información saliente de cada componente está definido por el ser el de las variables de salida de cada componente.

La información entrante a cada componente, puede ser de dos tipos:

- 1) La información que es salida de otro componente. Este tipo de variable cambia de valor durante la simulación, es función del tiempo.
- 2) La información que tiene un valor constante durante toda la simulación y que es tomada como parámetro del sistema.

II.3 - INGRESO DE DATOS

SIMSEC necesita para su funcionamiento los siguientes tipos de datos:

- a) Datos generales: como la hora de comienzo y finalización de la simulación, el paso de tiempo, el error que se tolera al iterar y en la resolución de las ecuaciones diferenciales.
- b) Datos sobre las unidades y tipo de los componentes: como el número total de unidades y el tipo que corresponde a cada unidad.
- c) Datos de los distintos tipos, como número de entradas, salida y parámetros.
- d) Entradas a una unidad : La entrada a una unidad, como se vió en II.2 puede ser una información cuyo valor cambia a lo largo de la simulación o bien tener un valor constante. Para el primer tipo de información debe indicarse el número de unidad de la que proviene y a que salida de dicha unidad corresponde. Por ejemplo la cuarta entrada a la subrutina Cubierta proviene de la subrutina Radia y es su segunda salida. SIMSEC pide también el valor inicial de esa variable.

Para la información constante, durante la simulación se indica que corresponde a la unidad 0, salida 0 y se le dá su valor. En este caso se encuentran todos los coeficientes convectivos que se tomaron con valor constante en la simulación.

d) Parámetros de una unidad : Para cada unidad debe ingresarse el valor de cada uno de los parámetros.

e) Derivadas de una unidad : Debe indicarse en Datsec, si las unidades tienen ecuaciones diferenciales de primer orden para resolver. El único módulo que presenta esta característica es Suelo.

f) Datos sobre orden de ejecución: finalmente debe indicarse en que orden se ejecutan las unidades y si hay ciclaje de alguna de ellas.

La forma de ingresar estos datos es por medio de un editor que necesita SIMSEC, llamado Datsec.

PARTE III - RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se simularon tres disposiciones del secadero existente en la localidad de Vaqueros, Salta con el objeto de sacar conclusiones sobre ellas.

Se analizaron el caso de armar el secadero como una sola cámara, el de dividirlo en dos cámaras con la primera de ellas sin producto, es

decir que la primera precaliente el aire y por último el de dos cámaras cargadas.

Con el objeto de comparar el ajuste del modelo con los datos experimentales, se muestran las figura 5 y 6.

Estas figuras corresponden a la simulación del secado del día 19.03.90 (radiación máxima 800 w/m²) con bandejas de agua en ambas cámaras. Cabe aclarar que se usó agua colocada en bandejas en lugar de algún producto, porque la situación de los primeros días de secado, en los que se extrae la mayor cantidad de agua, se asemeja al secado de una superficie de agua libre; además se evitan los problemas de abastecimiento y se facilitan las medidas.

Algunos de los parámetros del sistema correspondientes a la simulación del 19.03.90 se muestran en la tabla siguiente:

TABLA I	
Parámetros del sistema correspondientes a las Fig 5 y 6	
Flujo de aire	.44 kg/s
Area de Suelo	50 m ²
Area bandejas cámara 1	3.6 m ²
Area bandejas cámara 2	16.2 m ²
Humedad absoluta exterior	.012 kg/kg

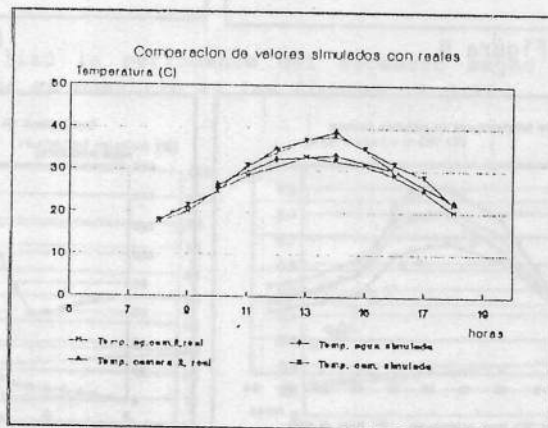
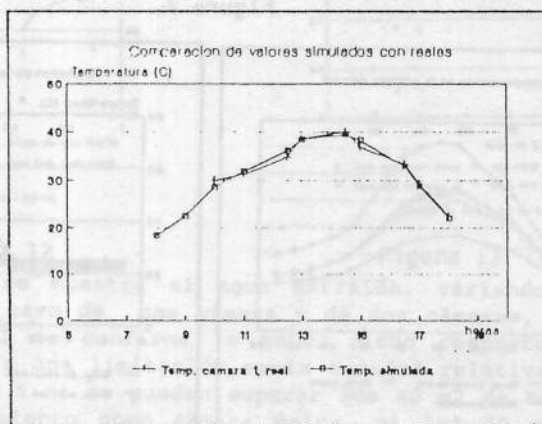


Fig 5 y 6 : Simulación del secado del 19/3/90

Las medidas se tomaron cada dos horas durante las horas de sol y son las de: radiación solar, temperatura ambiente, temperatura del aire en ambas cámaras y temperatura del agua. Se aprecia que el ajuste es aceptable.

Entre las figuras 7 y 11 se muestran los resultados de la simulación para el caso del secadero de Vaqueros funcionando con doble cámara. El flujo de aire es de 0.32 kg/seg. En la primera cámara hay 6 m² de bandejas de agua y en la segunda 14 m².

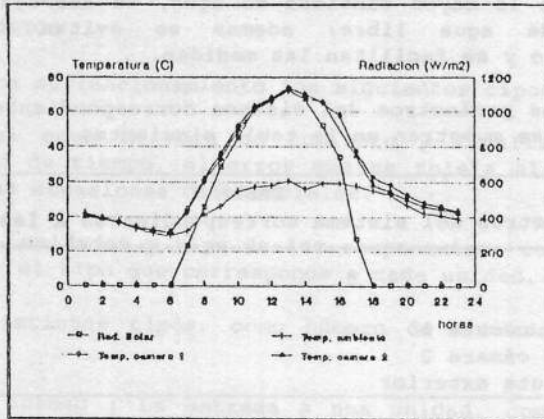


Figura 7.

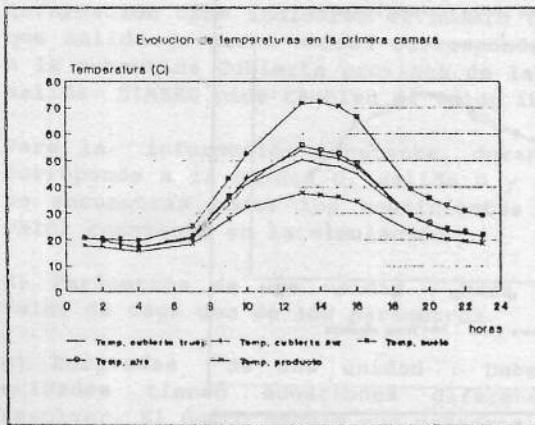


Figura 8.

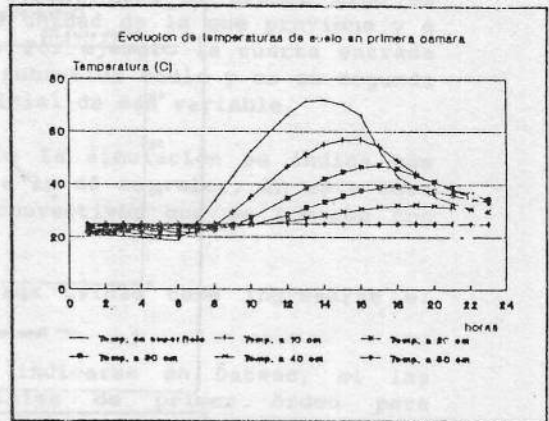


Figura 9.

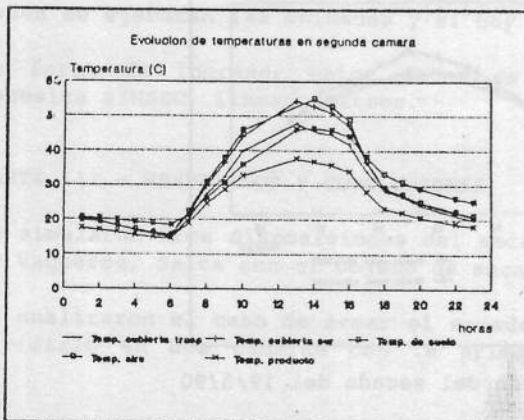


Figura 10.

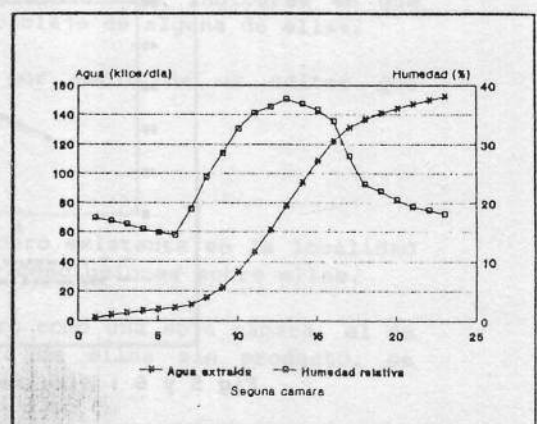


Figura 11.

Las figuras 12 y 13 corresponden al análisis de diferentes disposiciones del sistema.

La figura 12 muestra el agua extraída variando el flujo de aire para el caso del secadero de Vaqueros con 0.32 kg/seg de flujo de aire y humedad ambiente absoluta de 0.1 kg/kg. Se observa que frente a las tres configuraciones analizadas, la mas conveniente es la de dos cámaras con producto mas seco en la primera. Ademas' se desprende que existe un flujo óptimo para cada secadero, por encima del cual no aumenta la cantidad de agua extraída. Al superponer en la misma gráfica la humedad relativa media diaria en el interior del secadero, se observa que para esta configuración podría colocarse una superficie de bandejas superior a la empleada para la simulación, pues para valores de flujo de aire próximos al óptimo, la humedad relativa media del aire es de cerca de 30 % para el funcionamiento con cámara doble.

Agua extraída variando el flujo de aire

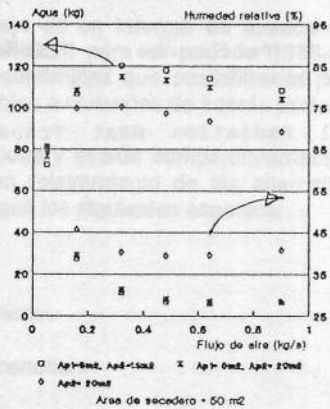


Figura 12

En la figura 13 se muestra el agua extraída, variando el área de producto, para el caso de una cámara y de dos cámaras, una de ellas sin producto. Aquí se confirma lo antes dicho respecto al área de bandejas, pues para una limitación en la humedad relativa del aire de aproximadamente 60 % no se pueden superar los 40 m² de bandejas en el caso del funcionamiento como cámara única, ni los 70 m² para doble cámara.

Agua extraída vs. area producto

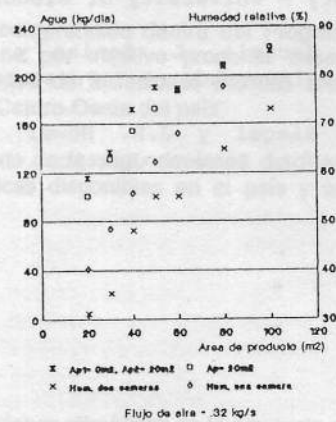


Figura 13

Finalmente se analizó la performance del secadero segun se define en (3). Los resultados se muestran en las figuras 14 y 15.

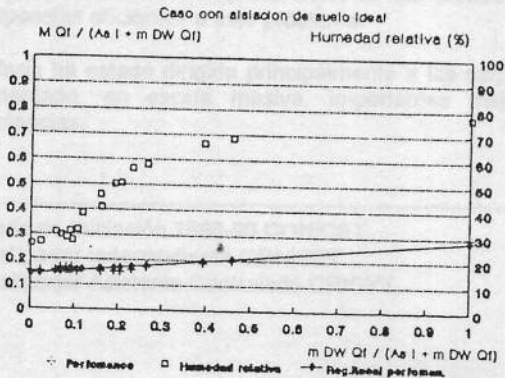


Figura 14

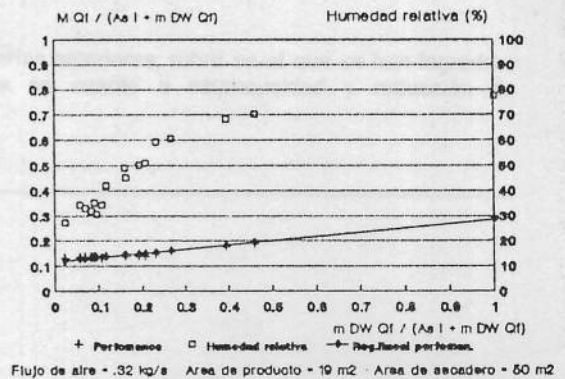


Figura 15

Se confirma que el modelo analítico desarrollado es correcto en el sentido de que la performance varía linealmente con los parámetros de las figuras y que la hipótesis de despreciar las pérdidas por el suelo también es correcta, ya que la performance del secadero es la misma en los casos en que el suelo está idealmente aislado o no tiene ningún tipo de aislación. Resta aún ajustar aquí la pendiente.

Se puede afirmar que el modelo desarrollado es una herramienta muy útil para evaluar diseños de secaderos y modelos analíticos mas sencillos.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - M. Kindelan "Dinamic Modeling of Greenhouse Environment" Transactions of the ASAE p.p. 1232-39 (1980)
- 2 - " TRNSYS 12.1 - A Transient Simulation Program " Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin (1984)
- 3 - L. Saravia, L. Zunino y R. Echazú " Performance y Diseño de Secaderos-invernaderos " Presentado en esta Reunión.
- 4 - R. Siegel y J.R. Howel " Thermal Radiation Heat Transfer" International Student Edition. Japan (1972).