

## **EL DISEÑO DE SECADORES SOLARES USANDO LAS CURVAS DE SECADO DEL PRODUCTO**

**Luis Saravia<sup>1</sup>, Dolores Alía de Saravia y Benjamín Sánchez**

INENCO, Instituto UNSa-CONICET, Bolivia 5150, (4400), Salta, Argentina  
Tel. 0054-387-4255424, e-mail: saravia#unsa.edu.ar

**RESUMEN.-** En el presente trabajo se explica un método de diseño de secadores solares industriales o semiindustriales para el caso en que la información disponible del producto sean las curvas de secado de una muestra del mismo. El método propuesto se basa en el cálculo computacional del comportamiento del secador mediante un programa de nombre Simusol usándose un modelo fenomenológico que se ajusta utilizando como datos experimentales las curvas de secado de la muestra. El programa Simusol permite el cálculo del comportamiento transitorio de sistemas térmicos y en este trabajo se agregan los elementos necesarios para incluir el uso del aire húmedo. El mismo opera en el sistema Linux bajo licencia GPL siendo de uso libre. Las curvas de secado del producto se obtienen experimentalmente en forma sencilla mediante un pequeño túnel de secado donde se ajusta la temperatura de secado y la velocidad del aire, midiéndose la temperatura del producto, temperatura y humedad del aire y pérdida de peso del producto como función del tiempo. En el trabajo se aplica el método al secado de bananas cortadas.

**Palabras claves:** simulación, Simusol, secado solar, curvas de secado, minisecador

### **1.- INTRODUCCIÓN**

El problema que se encara en este trabajo es el diseño de un secador solar encargado por un comitente cuando éste entrega como información del producto a secar una muestra del mismo.

El método a utilizar está basado en el uso de un programa de simulación numérica de sistemas solares térmicos, llamado Simusol que trabaja bajo el sistema operativo Linux con una licencia GPL. El mismo utiliza una interfaz gráfica para la entrada de datos mediante el programa Dia y realiza los cálculos numéricos con el programa Sceptre. Los resultados son dibujados mediante el Gnuplot. El Simusol ha sido desarrollado en el INENCO ( Saravia, 2003 ). En particular, las interfaces que preparan y conectan los programas y permiten el control de los datos que se introducen fueron escritos en Perl. En un trabajo anterior (Alía, 2003) se ha discutido la posibilidad de simulación de sistemas que combinan diferentes fenómenos físicos, tales como los térmicos-eléctricos, térmicos-mecánicos u otros. Aquí se extenderá su uso a la simulación de fenómenos térmicos relacionados con el aire húmedo.

Existen varios sistemas relacionados con equipos solares que involucran el aire húmedo, tales como secadores solares, invernaderos, edificios y otros. La simulación de secadores solares que se presenta en este trabajo constituye un ejemplo de análisis en el que evolucionan simultáneamente un sistema térmico y uno con aire húmedo.

A continuación se detallan las ecuaciones del proceso de secado. Luego se explica como realizar una experiencia de secado a pequeña escala para obtener los parámetros fenomenológicos que definen el secado del producto que interesa y se describe cómo calcular dichos parámetros. Finalmente se muestra cómo diseñar un secador real utilizando la simulación con los parámetros fenomenológicos que se obtuvieron a partir de las curvas de secado del producto

### **2.- ECUACIONES DEL PROCESO DE SECADO**

Se supone que el material esta disponible como trozos pequeños colocados sobre bandejas en la cámara de secado.

Los parámetros que determina el aspecto geométrico y las masas del producto son:

---

*1.- Investigador del CONICET*

$A_t$  = el área total de la superficie de todos los trozos  
 $M_t$  = la masa total del producto, función del tiempo  $\tau$   
 $M_{ti}$  = la masa total inicial  
 $M_s$  = la masa seca de producto  
 $M_l$  = la masa total de líquido contenido en el producto, función del tiempo  
 $X$  =  $M_l/M_s$  = la humedad del producto función del tiempo  
 $\Delta M_l$  = disminución de la masa de líquido del producto en el tiempo  $\Delta \tau$   
 $R$  =  $\Delta M_l / \Delta \tau = M_s \cdot \Delta X / \Delta \tau$  = la velocidad de secado del producto

Los parámetros térmicos del proceso de secado son:

$T_p$  = temperatura del producto  
 $T_{ce}$  = temperatura de entrada a la cámara de secado  
 $T_{cs}$  = temperatura de salida de la cámara de secado  
 $C_{pa}$  = calor específico del agua líquida  
 $C_{ps}$  = calor específico de la masa seca  
 $h_{fg}$  = calor de cambio de fase del líquido  
 $h_c$  = coeficiente de convección térmica de la superficie de cada trozo  
 $h_d$  = coeficiente de difusión del líquido por la superficie del trozo  
 $W_c$  = humedad absoluta de la cámara de secado  
 $W_a$  = humedad absoluta del aire ambiente  
 $W_{ps}$  = humedad absoluta de saturación del producto  
 $H_{rc}$  = humedad relativa del aire de la cámara  
 $p_a$  = presión atmosférica en el lugar de secado

Las ecuaciones básicas del comportamiento del trozo son dos.

Una es la ecuación de la velocidad de secado:

$$R = h_d \cdot A_t \cdot (W_s\{p_s(T_p)\} - W_c) \quad [1]$$

Se supone que el proceso de pérdida de vapor del producto hacia la cámara se realiza entre la superficie del líquido del producto donde el aire húmedo en contacto con el líquido se encuentra saturado a la temperatura del producto y el aire húmedo de la cámara con una humedad absoluta  $W_c$ . La velocidad de secado  $R$  será medida en un minisecador

La segunda es la ecuación diferencial del balance térmico del producto:

$$(C_{ps} + C_{pa} \cdot X) \cdot M_s \cdot (dT_p/d\tau) - h_{fg} \cdot M_s \cdot (dX/d\tau) = A_t \cdot h_c \cdot (T_c - T_p) \quad [2]$$

A la derecha de la fórmula [2] se expresa la transmisión de calor desde el aire al producto a través de la superficie del producto. El primer término de la izquierda muestra el calor acumulado en la masa del producto y el segundo término representa el calor utilizado en el cambio de fase de la evaporación del agua.

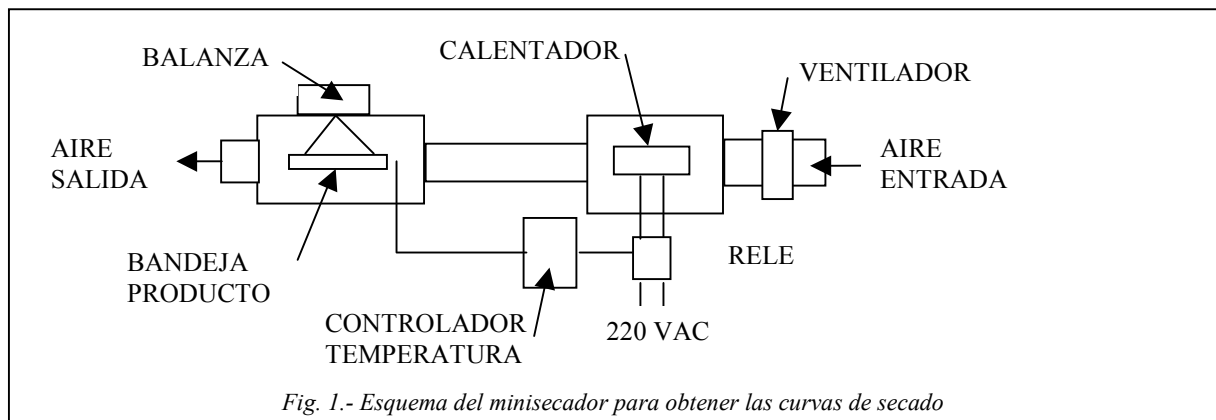


Fig. 1.- Esquema del minisecador para obtener las curvas de secado

Las fórmulas que determinan la humedad absoluta de una mezcla  $W$  como función de su temperatura  $T$  en grados centígrados y humedad relativa  $H_r$  son (Threkel, 1973):

$$ps(T) = 610.7 \cdot 10^{(8.2 \cdot T / (273 + T))} \quad [3]$$

$$Ws(ps, pa) = 0.622 \cdot ps / \{pa - ps\} \quad [4]$$

$$W = Hr \cdot Ws(ps), \quad [5]$$

donde ps es la presión de saturación del vapor de agua en el aire y pa es la presión atmosférica del lugar.

### 3.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CURVAS DE SECADO.

El equipo para la determinación de las curvas de secado de la muestra disponible, al que se le da el nombre de minisecador, se esquematiza en la figura 1. La figura 2 es una foto del minisecador.

El aire del ambiente es impulsado por un ventilador en el minisecador y un calentador levanta su temperatura para luego entrar en la cámara de secado. Un controlador de temperatura con una termocupla como sensor mantiene constante la temperatura del aire que entra a la cámara manejando el relé que alimenta el calentador. Una balanza digital mide y almacena periódicamente el valor del peso del producto colocado sobre la bandeja a través de una conexión serie de la computadora. Se miden mediante un datalogger la temperatura del aire, la del producto y la ambiente. Se utiliza un datalogger Campbell, termocuplas de cromel-alumel y una balanza electrónica Ohaus. La velocidad del aire en la cámara y la humedad relativa en la misma se miden a mano con un equipo Vaisala.

El equipo se ha ensayado utilizando muestras de banana, las que han sido cortadas en rodajas. La figura 3 muestra una foto de de la bandeja con la banana cortada antes de comenzar el proceso de secado.



Fig. 2.- Foto del minisecador

Tabla 1.- Parámetros del secado

Mt	Masa total inicial de producto	kg	0.371
Ms	Masa seca del producto (estimado)	kg	0.0974
X	Humedad del producto	kg/kg	Ver Fig. 4
Ati	Area total inicial del producto (calculada)	m <sup>2</sup>	0.282
Tc	Temperatura de la cámara	°C	40
pa	Presión atmosférica del lugar	pascal	87000
Hr	Humedad relativa del aire	%	25
V	Velocidad del aire en la cámara	m/s	1.6

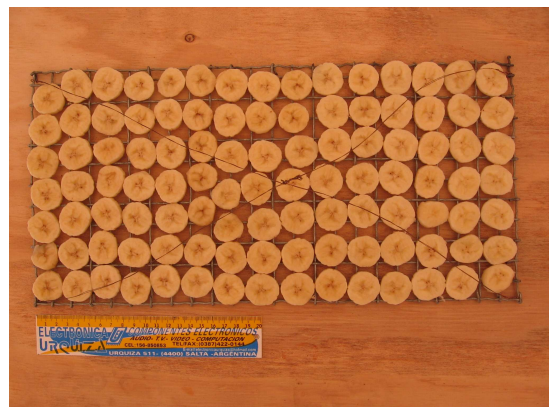


Fig. 3.- Muestra de bananas para secar colocadas en la bandeja. La regla mide 20 cm.

La Tabla 1 da los valores de los distintos parámetros para este caso. Las rodajas tienen un diámetro de unos 40 mm y una altura de 5 mm. La figura 4 muestra los valores medidos para la humedad de la muestra, X, como función del tiempo y el ajuste analítico de la misma como se explica más adelante. La figura 5 muestra la temperatura Tc del aire de la cámara y la temperatura Tp del producto a lo largo del secado.. La figura 6 da los valores de la humedad relativa del aire que entra a la cámara de secado.

El controlador de temperatura tiene un ciclo de prendido-apagado de algunos minutos, por lo que la temperatura en la cámara oscila con un intervalo de unos 4 grados. Ello se refleja en menor grado en las temperaturas medidas, las que muestran una pequeña oscilación.

#### 4.- CALCULO DE COEFICIENTES DE DIFUSIÓN Y CONVECCIÓN

La simulación se basará en las ecuaciones [1] y [2] del proceso. Las mismas tienen dos parámetros,  $h_d$  y  $h_c$ , que deberán ser ajustados usando las medidas experimentales de la velocidad de secado y temperaturas obtenidas con el minisecador. En estas ecuaciones también se presenta el área total  $A_t$ , la cual no es constante durante el secado debido a que se produce una contracción en las muestras del producto.

Como  $A_t$  aparece multiplicando a  $h_d$  y  $h_c$  se pueden determinar directamente los productos

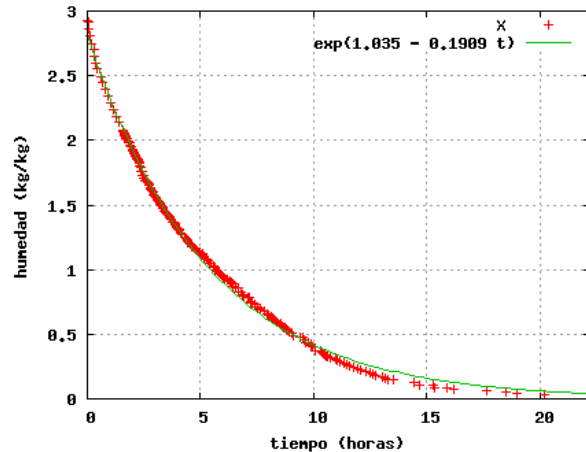
$$A h_d = A_t h_d \quad , \quad A h_c = A_t h_c \quad [6].$$

A continuación se explica la metodología usada para determinar los dos parámetros, que consta de dos etapas: el tratamiento de los datos experimentales y el cálculo de  $A h_d$  y  $A h_c$ .

En la segunda etapa se calculan los valores de  $A h_d$  y  $A h_c$ , ambos como función de  $X$ .

La primer etapa consiste en el tratamiento de los datos experimentales

Fig. 4.- Muestra la humedad del producto por kilogramo de masa seca,  $X$ . Las cruces dan los valores experimentales de  $X$  y la línea llena un ajuste exponencial



Los datos disponibles son las funciones  $X(\tau)$ ,  $T_p(\tau)$  y  $T_c(\tau)$  donde  $\tau$  es el tiempo. La figura 4 muestra los valores de  $X(\tau)$  en puntos indicados con +, obtenidos a partir de la masa medida del producto y el valor estimado de la masa seca. La figura 5 representa los valores de las temperaturas medidas. Estos datos tienen alguna dispersión que está producida no solamente por los errores experimentales, sino también por el hecho de que el controlador de temperatura es del tipo on-off. Ello produce una elevación de las temperatura de entrada a la cámara durante los períodos en que el mismo se prende dando lugar a una forma en zig-zag, que produce errores de consideración en las derivadas que se necesitan para calcular los parámetros  $A h_d$  y  $A h_c$ .

Por tal razón se han reemplazado los datos experimentales por funciones ajustadas del tiempo. Para  $X$ , la función resultante es:

$$X_a(\tau) = \exp(a-b*\tau), \quad [7]$$

con

$$a = 1.035 \quad , \quad b = 0.1989. \quad [8]$$

donde  $t$  está expresado en horas

La función  $X_a(\tau)$  se muestra en la figura 4 superpuesta a la curva experimental, donde se aprecia que las diferencias son muy pequeñas.

En lo que sigue también se utilizará la velocidad de secado ajustada  $R_a(\tau)$

$$R_a(\tau) = \{dX_a/d\tau\}(\tau) \quad [9]$$

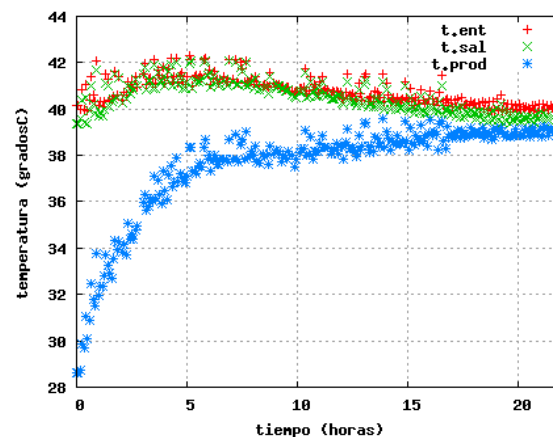


Fig. 5.- Puntos con +: valores experimentales de la temperatura de entrada a la cámara de secado. Puntos indicados con x: valores experimentales de la temperatura del producto. Puntos con \*: valores experimentales de la temperatura del producto.

Para la temperatura del producto  $T_p$  se obtiene un mejor ajuste utilizando una formula matemática del tipo

$$T_p(\tau) = (40 * \tau + 55.6) / (\tau + 1.94) \quad [10]$$

Donde  $\tau$  está expresado en horas.

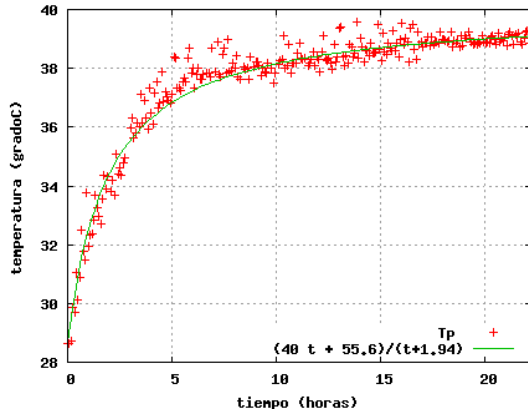


Fig. 6.- Muestra la temperatura medida del producto con cruces y su ajuste en una línea continua.

En este caso se han determinado los parámetros ajustando la curva en tres valores del tiempo.

La curva utilizada se superpone a los valores experimentales en la figura 6.

Finalmente, para la temperatura de la cámara,  $T_c$ , se adopta un valor constante.

$$T_{ca}(\tau) = 40 \quad [11]$$

Por último, se ha medido la humedad relativa del aire en la cámara. Sus variaciones son pequeñas, por lo que se asumirá un valor constante igual a 25%. La humedad absoluta, se obtiene aplicando las ecuaciones [3], [4] y [5]. Debe recordarse que las experiencias se han realizado en la ciudad de Salta, con una altura sobre el nivel del mar de 1240 metros, por lo que se ha adoptado una presión atmosférica de 87000 pascales. La humedad absoluta resultante es

$W_c = 0.0106$ .

En la segunda etapa se calculan los valores de  $A_{hd}$  y  $A_{hc}$ , ambos como función de  $X$ . Se introduce la hipótesis de que la variación de los parámetros es producida por cambios en el contenido de agua del producto a lo largo del secado. Ello corre la superficie de evaporación hacia el interior del producto dificultando el proceso. Como la función  $X(\tau)$  es monótona no hay problema en obtener  $\tau(X)$  y expresar  $A_{hd}$  y  $A_{hc}$  como funciones de  $X$ .

De la definición de  $R$  en [1] se despeja directamente el valor de  $A_{hd}(X)$ :

$$A_{hd}(X) = Ra(\tau(X)) / \{Ws[T_p(\tau(X))] - Wc\} \quad [12]$$

La figura 7 muestra los valores obtenidos para  $A_{hd}$ . Se hace notar que si bien no se dispone del valor de  $h_d$ , se puede obtener una idea aproximada dividiendo por el valor inicial del área  $A_t$ , que se obtiene de la tabla 1. Como se aprecia, los valores de  $A_{hd}$  disminuyen bastante a medida que se seca el producto.

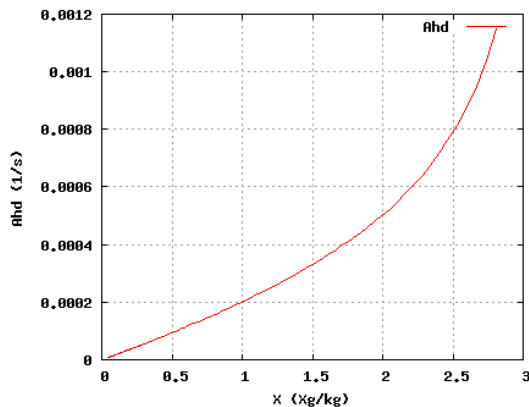


Fig. 7.- Muestra el valor de  $A_{hd}$  calculado como función de  $X$

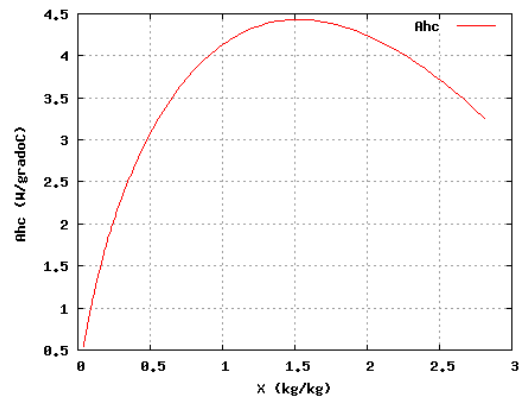


Fig. 8.- Muestra el valor de  $A_{hc}$  calculado como función de  $X$

El valor de  $A_{hc}(X)$  se despeja directamente de la ecuación de balance térmico [2], para lo cual se utilizan las derivadas de  $T_p$  y  $X$  respecto al tiempo. La función resultante se muestra en la figura 8. También se puede tener una idea del valor de  $h_c$  dividiendo por el valor inicial del área. Se constata que los valores de  $h_c$  varían en forma importante, entre 30 y 8. Cabe recalcar que a medida que se seca el producto, la diferencia entre la temperatura de la cámara y del producto es cada vez más pequeña, por lo que su medida puede tener un error considerable. Esto afecta directamente el cálculo de  $A_{hc}$  donde esa diferencia aparece en el denominador.

#### 4.- VERIFICACIÓN DEL CALCULO DE LOS PARÁMETROS

Una vez obtenidos  $Ahd(X)$  y  $Ahc(X)$  se puede verificar que es posible simular las ecuaciones del fenómeno utilizando un esquema adecuado en el Simusol.

El esquema, que se muestra en la figura 9, está descripto en forma gráfica utilizando el programa Dia. El gráfico representa dos fenómenos físicos: el intercambio térmico por un lado (dibujos con distintos tonos de gris) y el intercambio de vapor por el otro (dibujos con rellenos en blanco). Cada elemento del modelo (convección térmica, flujos de calor o masa, acumuladores de calor, etc) se representa con un símbolo, los nodos de temperatura o humedad absoluta se muestran con círculos grises o en blanco, y las rayas que unen los elementos a los nodos indican los intercambios de calor o de humedad a través de los elementos. Los cuadros entregan los datos numéricos que definen los elementos así como otros datos tales como la duración del cálculo, los resultados a mostrar, valores iniciales, etc.

El cálculo se hace utilizando los valores de la temperatura de cámara y humedades iguales a las usadas en la evaluación de los parámetros.

En el esquema de la figura 9, el nodo Tcs representa la temperatura del aire en la cámara, y  $Tp$  la temperatura del producto. La temperatura del nodo Tcs está fijada por la fuente de temperatura Tcs. En el circuito de vapor los nodos correspondientes se designan como Wcs y Wp. En este caso cada nodo representa la humedad absoluta del vapor. La transmisión de calor desde el aire al producto a través de su superficie se indica con la convección térmica identificada con el número 25. Por otro lado, la evaporación desde el producto al aire implica un transporte térmico dado por el flujo 25. Paralelamente el flujo de vapor desde el producto está dado por la resistencia difusiva 120.

Finalmente, se almacena calor en la masa del producto, acumulador  $Tp$ . Dado que el flujo de vapor de agua evaporado está dado por la resistencia difusiva 120, su integral dará la cantidad total de agua evaporada. Esta integral está indicada en el cuadro de parámetros mediante la siguiente expresión:

$$DPagua = -FLUJO R120 , \quad [11]$$

donde Pagua es la masa de agua y la D indica que se está tomando su derivada. Esta derivada es igual al flujo a través de R 120.

Los datos de cada elemento se dan en el cuadro DATOS, usando los parámetros identificados en el cuadro PARÁMETROS. Algunos datos son función de ciertas variables y se dan por puntos en los archivos mencionados en el cuadro "TABLAS\_ARCHIVOS". El archivo areahhd.csv da los valores de  $Ahd$  y  $Ahc$  como función de X.

Los resultados que se obtienen para la masa de agua y temperatura del producto coinciden totalmente con los que se usaron para el cálculo de  $Ahd$  y  $Ahc$ , figuras 4 y 6, por lo que no se muestran.

#### 5.- LA SIMULACIÓN DE UN SECADOR A ESCALA REAL.

Los Valores de  $Ahd$  y  $Ahc$ , obtenidos a partir de las curvas de secado medidas en una muestra pequeña, son usados para el diseño de secadores a escala real utilizando nuevamente el Simusol. La cámara de secado será simulada en forma muy similar a lo mostrado en la figura 9. Para la simulación del colector se dividirá el mismo en secciones, cada una con una temperatura distinta para tener en cuenta la variación en la temperatura del aire a lo largo del colector. El aire caliente deberá conectar con el circuito de la cámara de secado. Se pueden simular distintos tipos de secadores. Ello no se muestra en el presente trabajo por razones de espacio.

#### 6.- CONCLUSIONES

Si se dispone de un minisecador, que es de muy fácil construcción, la metodología aquí explicada permite evaluar rápidamente el dimensionamiento de un secador real para satisfacer las necesidades de un comitente.

El modelo utilizado es muy simple y no tiene en cuenta varios factores. Por ejemplo, no se ha considerado la disminución del área de producto a medida que este se seca. A pesar de ello se logra una simulación razonable porque estos aspectos quedan incorporados en el valor de  $Ahd$  y  $Ahc$ .

Los valores obtenidos para  $Ahc$  y  $Ahd$  serán válidos únicamente para las condiciones en que se ha secado la muestra en el minisecador y el secado en éste se debe realizar en condiciones muy similares a las que se utilizarán en el secador real.

Aún no se ha estudiado la dependencia de los coeficientes  $hc$  y  $hd$  con la temperatura del producto y la velocidad del aire del secador. Estos aspectos serán analizados en un trabajo posterior.

#### 7.- REFERENCIAS

D. Alía y L. Saravia, Simulación de distintos sistemas físicos con SIMUSOL, AVERMA, editorial ASADES, vol. 7, 08.85, 2003.

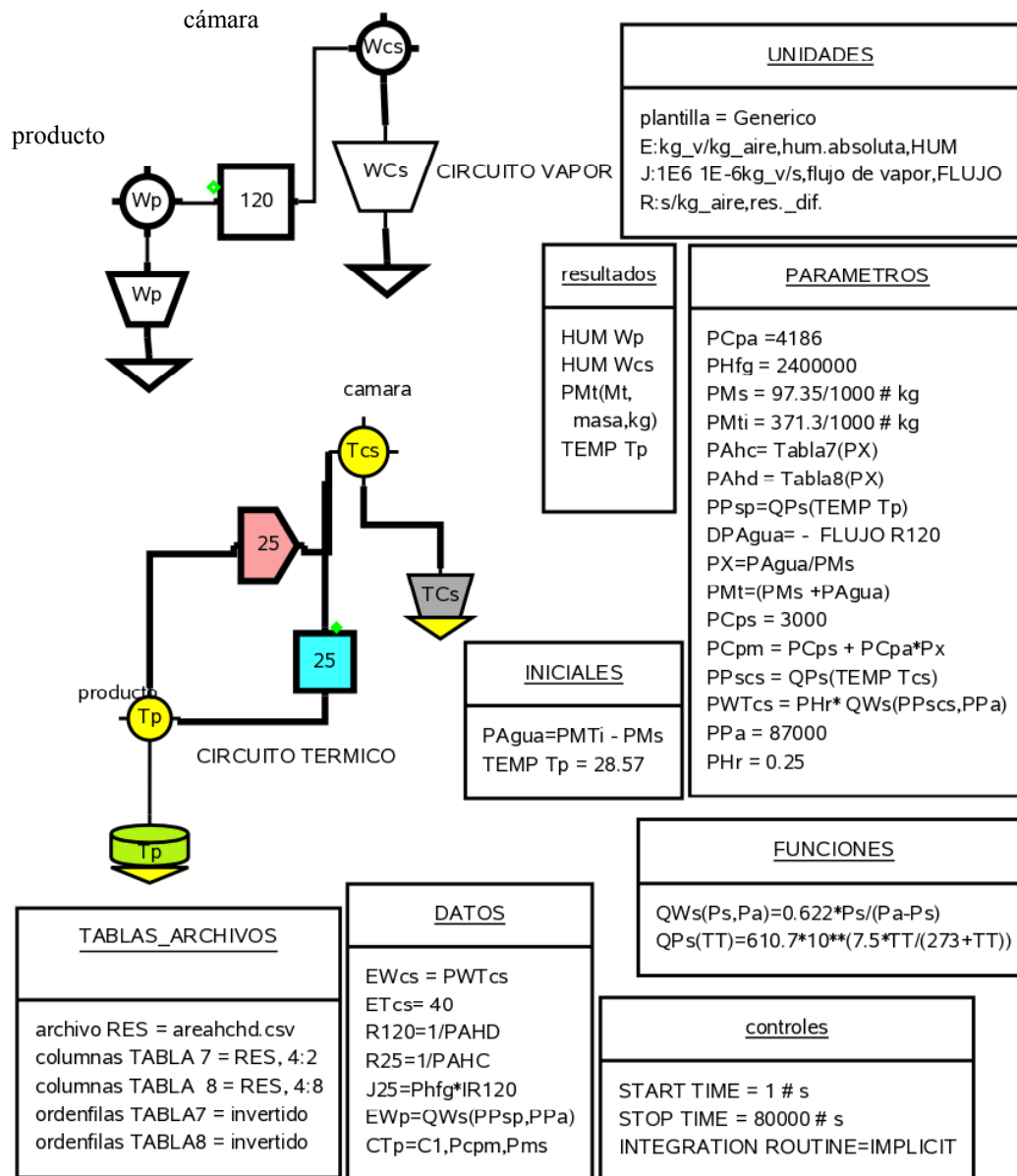


Fig. 9.- Esquema dibujado en Simusol para verificar la simulación de las ecuaciones del fenómeno

## THE DESIGN OF SOLAR DRIERS USING THE PRODUCT DRYING CURVES

**ABSTRACT.-** In the present paper an industrial solar drier design method is explained considering the product drying curves. The method is based in the computational calculation of the drier behavior using a program known as Simusol and introducing a phenomenological model which is adjusted using the drier curves as an input. The Simusol program allows the evaluation of thermal systems and it was extended to consider the humid air behavior. The program works with the Linux operative system using a GPL license allowing its free use. The drying curves are obtained experimentally using a small drying tunnel where the drying temperature and air velocity are adjusted. The product temperature, the air humidity and temperature and the weight loss are measured as a function of time. The procedure has been tested with bananas.

**Keywords:** simulation, Simusol, solar drying, drying curves, minidrier