

## METODO DE DISEÑO DE SISTEMAS DE SECADO DE PRODUCTOS AGRICOLAS

MATILDE CASERMEIRO Y LUIS SARAVIA\*

INENCO#, Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177, 4400 Salta

### Resumen

El presente trabajo tiene como fin presentar un programa para computadora que permite simular el comportamiento de un secadero solar, suponiéndolo como una serie de cañerías por donde circula aire, procurando disponer de una herramienta de cálculo de fácil acceso, uso sencillo que pueda ser adaptada a casos particulares del usuario.

Los efectos se han tenido en cuenta en los siguientes puntos:

- el programa puede ser usado en computadoras del tipo personal.
- el lenguaje utilizado es el BASIC interpretativo.
- los métodos numéricos empleados son del tipo sencillo.

El programa realiza el cálculo de los gradientes de presiones y temperaturas de los flujos de aire en cada elemento.

Los distintos elementos que forman parte de la red se interconectan en puntos llamados nodos, cuyas presiones se determinan en el programa, conociendo la presión inicial de cálculo.

Las temperaturas se evalúan a la entrada y a la salida de cada elemento iniciando el cálculo con una temperatura dada.

Los flujos se calculan para cada elemento una vez determinadas las presiones en los nodos.

La manera de cómo los elementos están interconectados formando la red, es un dato que requiere el programa.

Además es conocido el tipo de elemento que se trata también sus longitudes

\* Investigador del CONICET

Instituto UNSa. - CONICET

y medidas características. (1).

### Introducción

El secado de productos agrícolas es un tema de importancia en la Argentina debido a los niveles de producción y exportación actuales.

Dentro del grupo de Energía Solar del INENCO se trabaja, desde el año 1977 en el secado de dos productos: tabaco y pimiento. En ambos casos se han utilizado colectores calentadores de aire y cámaras de secado por donde circula el aire.

Dependiendo de cada caso en particular se pueden presentar diseños muy distintos en lo que se refiere a tipo de colector, forma de la cámara de secado, recirculación de aire, uso de acumuladores de calor, disposición de los ventiladores, etc.

Se detecta entonces, la necesidad de preparar un programa numérico general de diseño de sistemas solares de secado por aire caliente.

La popularización de las computadoras personales, con velocidades razonables, permite encarar el desarrollo de programas de cálculo que involucren un tiempo aceptable, si se admite un cierto sacrificio en la exactitud de los resultados mediante el uso de modelos numéricos sencillos.

El uso de un lenguaje BASIC interpretativo permite generar programas fácilmente adaptables a las necesidades particulares del usuario.

En las secciones que siguen se presenta un método de cálculo de este tipo, preparado para computadoras personales que usan el BASIC interpretativo del sistema operativo MS. DOS, uno de los más utilizados actualmente.

Una versión preliminar del programa se encuentra disponible conjuntamente con un manual explicativo que comprende un manual de uso y una explicación detallada con el fin de introducir modificaciones si es de interés.

### Descripción del Modelo del Secadero

A los efectos de la simulación del secadero, los nodos del sistema de cañerías se identifican por un índice  $j$  ( $j = 1$  a  $NN$  número total de nodos), cada uno de los cuales se encuentra a una presión  $PRE(j)$ , las que son objetivo del cálculo.

Los nodos están en contacto entre sí a través de elementos tales como tubos de sección cuadrada o redonda, codos, ventiladores, diafragmas, ensanchamientos y estrechamientos de la sección de los tubos, bifurcaciones, cámara de secado, colectores, etc., a los que se le dará el nombre genérico de "elementos", por los cuales circula un flujo de aire y están sometidos a un gradiente de temperatura, los que se evaluarán en el programa.

Cada uno de los elementos debe ser descrito para que el programa central, SIMSECA, los incorpore al proceso de cálculo. A esos efectos se dispone de un conjunto de rutinas cuya relación se esquematiza en la figura 1.

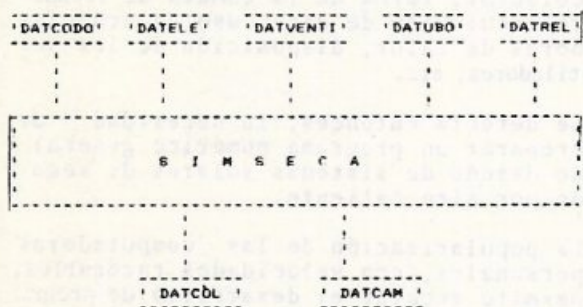


Figura 1

Cada una de las rutinas comete al usuario a un interrogatorio para obtener los datos, los que se guardan en un archivo para su uso posterior en el programa SIMSECA. La rutina DATREL, determina las relaciones espaciales entre los elementos y los diferentes nodos a cuyos efectos es conveniente preparar un diagrama previo de la red de tubos como el que se muestra en la figura 2, en la que se indica los distintos nodos y

elementos, estableciendo qué elementos están unidos a cada nodo.

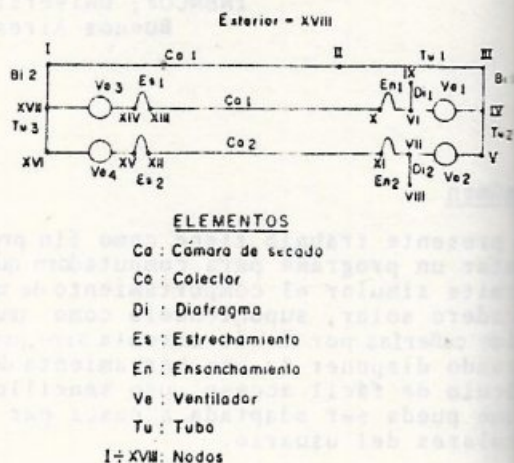


Figura 2

El modelo utilizado para simular el secadero requiere que entre dos nodos consecutivos solo exista un elemento, por lo tanto el cálculo del flujo de aire en cada uno de ellos dependerá solo del tipo de elemento que se trate y de la diferencia de presión entre los nodos unidos por él.

Es además necesario, indicar una presión y una temperatura de inicio de cálculo para cada nodo.

### Método de Cálculo

El objetivo del programa SIMSECA es calcular la presión en cada nodo del sistema de tubos y demás elementos y el caudal de aire que pasa por cada elemento, como así también la temperatura a la entrada y a la salida de cada elemento.

Con tal fin se ha usado un método de cálculo simple que se detalla a continuación:

### Incógnitas del problema

- a.- Presión en cada nodo del sistema.
- b.- Caudal de aire en cada elemento.
- c.- Temperatura a la entrada y a la salida de cada elemento.

Para la resolución del inciso "a"

Antea un sistema de ecuaciones no lineales de NN ecuaciones por NN incógnitas, donde NN es el número total de nodos del sistema y se resuelve por el método de las aproximaciones sucesivas.

Para la resolución del inciso "b" se plantea la ecuación de la caída de presión en cada nodo se calcula el caudal correspondiente.

Para la resolución del inciso "c" se plantea un balance de entalpía en cada elemento y las ecuaciones que vinculan la temperatura a la salida de cada elemento con la temperatura de entrada al mismo elemento, resultando un sistema de 2\*L+NN ecuaciones por 2\*L+NN incógnitas donde L es la cantidad de elementos de la red y se resuelve con método de cálculo iterativo.

Título de la Caída de Presión en Cada Elemento y de los Caudales que Circulan por Ellos

En un sistema de elementos interconectados a través de nodos, la suma de los caudales de aire exteriores al nodo más los caudales de aire de los elementos que llegan a él, que llegan o salen del mismo, debe ser nula.

Es decir, en cualquier nodo libre "j" en el que no esté especificada la presión debe equilibrarse el balance de caudales procedentes de los nodos "i" vecinos y los caudales exteriores. (3)

Para realizar el balance se toma la siguiente convención:

- Q(i): caudal que sale o entra al nodo "j" proveniente del nodo "i" (m<sup>3</sup>/seg)
- q(j,i) es positivo si llega al nodo "j"
- Q(j): es el caudal de aire exterior al nodo "j" (m<sup>3</sup>/seg)
- Q(j) es positivo si llega al nodo "j"
- Q(j) es negativo si sale del nodo (j).

Para cada elemento se debe conocer la ecuación que relaciona la caída de presión en el mismo elemento con el caudal que pasa a través de él. A título de ejemplo se muestra la relación correspondiente a hornos, cámara de secado y colectores, asumiendo relaciones similares para ventiladores, cambios de sección, codos, etc.

La caída de presión entre los nodos unidos por un tubo viene dada por la ecuación de Fanning:

$$P(i) - P(j) = C_x q(j,i)^2 \quad \text{Formula 1}$$

$$C = LANDA \times L \times RO \times 16 / gc \times D^5 / 2/3 \times 1.14159 \times 2$$

- P(i) : Presión en el nodo "i" (mm CA)
- P(j) : presión en el nodo "j" (mm CA)
- P(i) > P(j)
- C : constante del tubo (mm CAseg<sup>2</sup>/m<sup>6</sup>)
- LANDA : coeficiente de fricción del tubo que depende del número de Reynold
- RO : densidad del aire (kgm/m<sup>3</sup>)  
La densidad del aire depende de la presión atmosférica del lugar y de la temperatura de él y se calcula:

$$RO = P_x M_x .001 / R(TT + 273)$$

P : presión atmosférica de lugar (mm CA)

M : peso molecular del aire = 29 gm/mol

R : constante de los gases = .82057 mm CA m<sup>3</sup> mol x K

TT: temperatura (C)

- gc : 10 kgm x m / kg f x seg<sup>2</sup>
- D : diámetro de la sección del tubo (m)

Si la sección del tubo es cuadrada el diámetro que se utiliza para el cálculo es el diámetro equivalente que se calcula:

$$D = (((A \times B) \times .625) / ((A + B) \times .25)) \times 1.3$$

A: lado menor de la sección del tubo (m)

B: lado mayor de la sección del tubo (m)

Según sea el flujo laminar o turbulento el número de Reynold toma valores distintos:

- Re = q(j,i) x D x 4/3 x 1.14159 x D<sup>2</sup> x NI
- Re : número de Reynold (adimensional)
- q(j,i): caudal de aire (m<sup>3</sup>/seg)
- D : diámetro de la sección del tubo (m)
- NI : viscosidad cinemática del aire (m<sup>2</sup>/seg)
- La viscosidad cinemática NI depende de la temperatura y se calcula: (4)

$$NI = NI_o \times ((TT + 273) \times .67)$$

NIo: viscosidad cinemática a la temperatura de 273 K = .0000132 m<sup>2</sup>/seg

TT : temperatura (C)

Si Re > 5000 el flujo es turbulento y el coeficiente de fricción LANDA se calcula: (5)

$$\text{LANDA} = .025/(\text{LOG}(E/3.7/D/1000 + 5.4/RE*.9)\text{LOG}(10))^2$$

E : rugosidad del material del tubo (mm)

D : diámetro de la sección del tubo (m)

Si Re 3000 el flujo es laminar y el coeficiente de fricción LANDA se calcula:

$$\text{LANDA} = .64/RE$$

La rutina DATUBO calcula el valor de C que se utilizara en el programa central para realizar el cálculo del caudal en el tubo y de la presión en los nodos u nidos por este elemento.

Las rutinas DATCAM y DATCOL calculan el valor de C que se utilizara en el programa central para realizar el cálculo del caudal en la cámara de secado y en los colectores, respectivamente, y de la presión en los nodos unidos por estos elementos.

Para calcular el valor de C se requiere entonces, calcular previamente el valor de LANDA. Para realizar este trabajo es necesario calcular el Reynold, para lo cual se precisa conocer el caudal en el tubo.

Para poder realizar esta tarea se supone en cada rutina un caudal aproximado en cada elemento y luego en el programa central, en cada iteración del método de las aproximaciones sucesivas, citado anteriormente, se va recalculando el caudal y los valores de LANDA, hasta llegar a una diferencia mínima entre los valores obtenidos en dos iteraciones sucesivas.

El cálculo del caudal que circula en un tubo se determina a partir de la fórmula 1.

$$q(j,i) = P(i) - P(j) \times (\text{ABS}(C \times P(i) - P(j)))^{-.5}$$

Fórmula 2 .

Si  $P(i) < P(j)$  entonces  $q(j,i) < 0$  y por lo tanto, según la convención tomada, el caudal  $q(j,i)$  tiene la dirección saliendo del nodo "j".

### Sistema de ecuaciones No Lineales

Se supone un sistema de "NN" nodos denotados con el índice "j" ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ) y CANTI(j) nodos unidos al nodo "j" denotados con el índice "i" ( $i = 1, 2, 3, \dots, \text{CANTI}(j)$ )

Para realizar el cálculo de la presión en cada nodo se plantea la Ley de Con-

servación del Flujo en cada nodo o Ley de Kirchhoff que enuncia:

Para el nodo "j"

$$\sum_{i=1}^{\text{CANTI}(j)} q(j,i) + Q(j) = 0$$

$j = 1, 2, 3, \dots, m$  Fórmula

$q(j,i)$  : flujo que sale o llega al nodo "j" proveniente del nodo "i" ( $m^3/\text{seg}$ )

$Q(j)$  : flujo exterior que sale o llega al nodo "j" ( $m^3/\text{seg}$ )

Además debe cumplirse:

$$\sum_{j=1}^m Q(j) = 0$$

Fórmula

La suma de todos los flujos exteriores es nula para todos los nodos.

Teniendo en cuenta que el flujo entre dos nodos consecutivos está dado por fórmula 2, reemplazando en la fórmula 1:

$$\sum_{i=1}^{\text{CANTI}(j)} \frac{P(i) - P(j) \times (\text{ABS}(C \times (P(i) - P(j))))^{.5}}{+Q(j)}$$

Se obtiene entonces, el valor de  $P(j)$ , presión en cada nodo "j" despejando la Fórmula anterior:

$$Q(j) + \sum_{i=1}^{\text{CANTI}(j)} P(i) \times (\text{ABS}(C \times (P(i) - P(j))))^{.5} = P(j) \times \sum_{i=1}^{\text{CANTI}(j)} (\text{ABS}(K \times (P(i))))^{.5}$$

Fórmula

El método de las Aproximaciones Sucesivas utiliza la Fórmula 4 para realizar en forma iterativa el cálculo de la presión en cada nodo "j".

### Cálculo de la temperatura a la Entrada y a la Salida de Cada Elemento

En un sistema de elementos interconectados a través de nodos, la suma de las entalpías de los flujos de aire que salen o llegan a ellos es nula. Por lo tanto se dispone de NN ecuaciones de la forma: (5)

$$\sum_{i=1}^{\text{CANTI}(j)} q(j,i) \times c_p \times R_O \times \text{TEMPE}(j,i) + Q(j) \times c_p \times R_O \times \text{TEXT} = 0$$

Fórmula

donde

$Q(j,i)$  : flujo que sale o llega al nodo "j" proveniente del nodo "i" ( $m^3/seg$ )

$C_p$  : calor específico del aire (joule/kg/C) se supone constante con la temperatura

$\rho$  : densidad del aire a la temperatura TEMPE(j,i) ( $kg/m^3$ )

TEMPE(j,i) : temperatura del flujo de aire a la salida o a la entrada del elemento que une los nodos "j" e "i" según el flujo llegue o salga del nodo "j" respectivamente (C)

$Q_j$  : caudal exterior al nodo "j" ( $m^3/seg$ )

TEXT : temperatura exterior a la que entra el caudal exterior al nodo "j"

En cada elemento la caída de temperatura del flujo de aire que circula por depende del tipo de elementos de que se trate,

Las ecuaciones que describen este gradiente con el uso de un tubo, emitiendo otro para colectores, cámaras de secado, codos, etc.

$$TEMPE(j,i) = TEXT + \frac{(TEMPE(i,j) - TEXT) \cdot \exp\left(\frac{3.1459 \cdot D \cdot L \cdot U}{c_p \cdot Q(j,i) \cdot R}\right)}{1 - \exp\left(\frac{3.1459 \cdot D \cdot L \cdot U}{c_p \cdot Q(j,i) \cdot R}\right)}$$

Fla.7

TEMPE(j,i) : temperatura del flujo de aire a la salida del tubo que une los nodos "j" e "i" (C)

TEXT : temperatura externa (C)

$U$  : coeficiente global de transferencia de calor del tubo ( $W/m^2C$ )

TEMPE(i,j) : temperatura del flujo de aire a la entrada del tubo que une los nodos "j" e "i" (C)

$Q_j$  : caudal de aire que circula por el tubo desde el nodo "i" al nodo "j" ( $m^3/seg$ )

$\rho$  : densidad del aire a la temperatura TEMPE(j,i) ( $kg/m^3$ )

$C_p$  : calor específico del aire (Joule/kg/C) se supone constante con la temperatura.

$D$  : diámetro del tubo (m)

$L$  : longitud del tubo (m)

Las ecuaciones son no lineales con res

pecto a las incógnitas TEMPE(j,i), por lo que el método iterativo utilizado fue usado con el objetivo de simplificar los cálculos de las funciones y de las derivadas en cada iteración.

El programa realiza el siguiente método para evaluar las temperaturas:

- 1.- Entrada de las temperaturas iniciales para el cálculo.
- 2.- Determinación de las temperaturas fijas. En este paso se eliminan F incógnitas.
- 3.- Evaluación de la densidad del aire según la fórmula:

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot (T + 273)}$$

P : presión atmosférica del lugar (mm CA)

M : peso molecular del aire = 29 grm/mol

R : constante de los gases =  $0.287 \frac{mm \cdot CA \cdot m^3}{mol \cdot K}$

TEMPE(j,i) : temperatura del flujo de aire (C)

La densidad del aire se evalúa a la salida de cada elemento.

- 4.- Evaluación de la temperatura a la salida de cada elemento utilizando las fórmulas como la 7. En este paso se evalúan las variables.
- 5.- Utilización de la fórmula 5 para evaluar las NN ( $2 \cdot L + NN$ ) - F incógnitas restantes según:

$$TEMPE(j,i) = \frac{\sum_{i=1}^K q'(j,i) \cdot 273 \cdot TEMPE'(j,i) / TEMPE'(j,i) + Q'(j) \cdot 273 \cdot TEXT' / TEXT' + 273}{1 - \sum_{i=1}^K \frac{CANT_i(j) - K}{1} q(j,i) + \sum_{i=1}^K q'(j,i) \cdot TEMPE'(j,i) / TEMPE'(j,i) + 273 + Q'(j) \cdot TEXT' / TEXT' + 273}$$

donde

TEMPE(j,i) : temperatura de los flujos negativos  $q(j,i)$   
Puede ser una temperatura de un flujo exterior negativo  $Q(j)$

K : cantidad de nodos en contacto con el nodo j que cumplen que los flujos  $q'(j,i)$  son positivos

TEMPE'(j,i) : temperatura de los flujos positivos  $q'(j,i)$   
Puede ser una temperatura

de un flujo exterior positivo  $Q'(j)$

Realizados los 5 pasos por primera vez se comienzan las iteraciones desde el paso 3 al 5 hasta terminar el cálculo con una diferencia de los resultados entre dos iteraciones sucesivas tan pequeñas como se quiera.

La figura 3 muestra el diagrama de bloques correspondiente al método de cálculo descrito que se realiza en el programa central SIMSECA.

## Resultados Alcanzados

El programa está siendo ajustado para generalizar su uso a cualquier tipo de sistema de redes.

Los resultados obtenidos para los sistemas simulados fueron satisfactorios.

## Referencias

- 1.- Jacoby, Samuel L.S. y Kowalik, Stanislaw S. "Mathematical Modeling with computers". Ed. Prentice Hall, 1980.

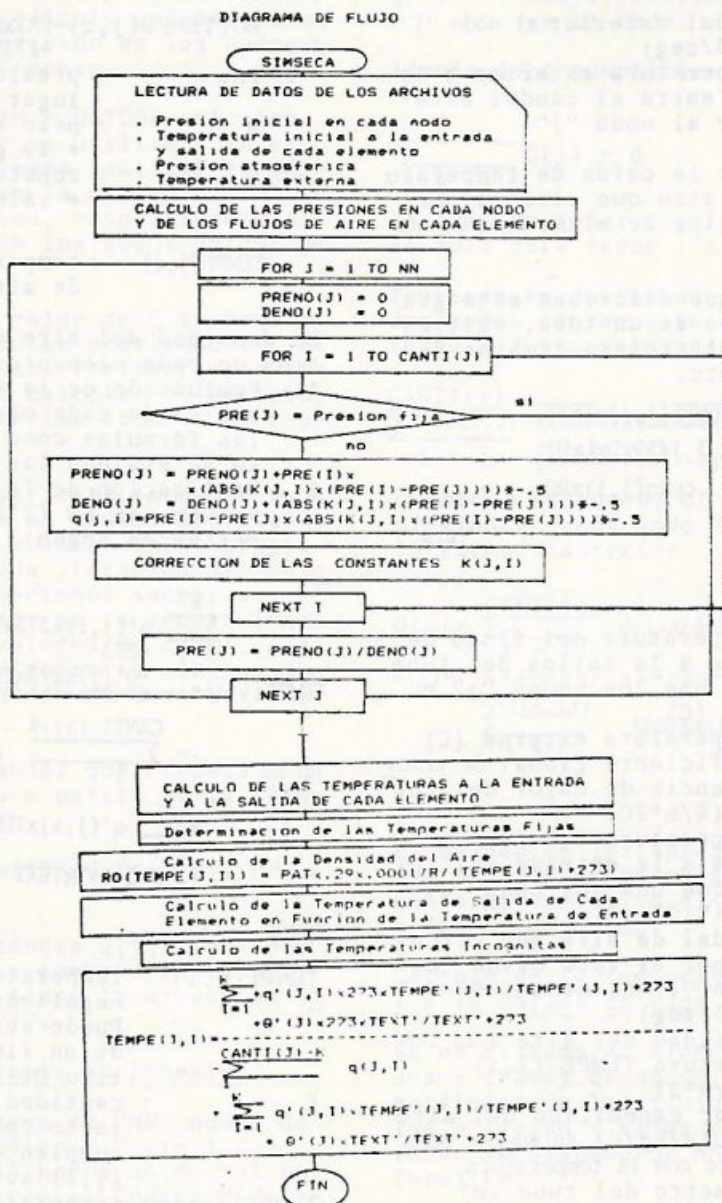


Figura 3

Becknagel - Sprenger. "Manual de Calentamiento y Climatización". Ed. Blume 1972.

Carnahan, Brice; Luther, H.A. y Wilkes, James O. "Cálculo Numérico, Métodos, Aplicaciones". Ed. Rueda, 1979.

White, Frank M. "Mecánica de los Fluidos". Ed. Libro Mc. Graw-Hill, Inc., U.S.A. 1979.

Miller, Donald S. "Internal Flow System". BHRA. Fluid Engineering. 1978.

Comunicación Personal. Dr. Luis R. Saravia Mathon.

Duffie, John A.; Beckman, William, "Solar Energy Thermal Processes". Ed. John Wiley & Son. 1979.

Threlkeld, James L. "Ingeniería del Ambito Térmico". Ed. Prentice Hall, Inc. 1973.