

SIMULACION NUMERICA DE UN SECADERO SOLAR

I. De Paul, E. Frigerio, L. Saravia*

Grupo de Energía Solar, Departamento de Ciencias Exactas
Universidad Nacional de Salta - 4.400 Salta, Argentina.

Resumen:

La predicción detallada del comportamiento de un sistema solar de secado compuesto por un colector, un acumulador de piedras y una cámara de secado requiere una simulación numérica en computadora. Este estudio se ha realizado con el fin de optimizar el diseño de un sistema de secado de tabaco y determinar el porcentaje de reemplazo de energía convencional por solar.

Las curvas de temperatura y humedad en la cámara de secado, así como la de pérdida de peso del producto son tomadas de experiencias realizadas a escala piloto. La radiación horaria sobre el colector solar se calcula a partir de datos de radiación diaria sobre superficie horizontal. La eficiencia del colector se obtiene mediante una expresión analítica sencilla con los parámetros ajustados experimentalmente. El acumulador de piedras es calculado mediante un método en diferencias finitas. Se tienen en cuenta distintos esquemas de sistemas de control.

Se analizan los resultados obtenidos para las situaciones de secado más comunes.

Abstract:

The prediction of the behaviour of solar drying system consisting of a collector, a pebble bed accumulator and a dryer requires numerical simulation in a computer. The purpose of this paper is to optimize the design of a solar tobacco drying system and to determine the solar heating fraction. The temperature and humidity conditions in the dryer, as well as the weight loss of the product are experimental values obtained in a prototype. The hourly values of radiation available for the solar collector are calculated from daily values on a horizontal surface. The collector efficiency is calculated with a simple analytical expression where the parameters are determined experimentally. The pebble bed accumulator performance is calculated with a finite difference method. Several working schemes are considered. The results for several of the most common drying processes are analyzed.

* Investigador de la CNEGH

1.- Introducción

El Grupo de Energía Solar de la UNSa. se encuentra trabajando en el diseño de un sistema solar de secado de tabaco tipo Virginia. Un estudio previo en el que se explicó la posible importancia económica del sistema y se estableció un procedimiento de trabajo, fue presentado en la última Reunión de ASADES (1). Se planteó la necesidad de encarar el estudio por dos vías. Por un lado se necesitan datos físicos del proceso de secado y comportamiento térmico del sistema solar. Estos datos se obtuvieron mediante un prototipo sobre cuyos detalles de construcción y datos de funcionamiento se presenta otro trabajo en esta Reunión (2). Por otro lado, y sobre la base de los datos obtenidos con el prototipo, se debe diseñar un sistema a escala natural (tamaño del colector y acumulador, flujos de aire, sistemas de control, etc.). Dado lo complejo del sistema y la irregularidad de la fuente energética la vía de diseño consiste en plantear una simulación numérica que permita variar y ajustar cada parámetro, optimizando el funcionamiento del conjunto. En la sección 2 se describe la estructura general de la simulación planteada, y en las siguientes se detalla la estructura de cada una de sus partes. Por último se discutirán los resultados obtenidos hasta este momento.

2.- Estructura General

El proceso de secado tiene una duración aproximada de 136 hs. y ha sido dividido en cierto número de intervalos en los cuales se fijan las condiciones de funcionamiento de la estufa (temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, pérdida de agua, etc.), de acuerdo a los datos experimentales obtenidos en un prototipo. (Figura 1). El programa calcula el funcionamiento general del sistema de secado de hora en hora, durante las 136 hs. que dura el proceso. La simulación del secadero se planteó siguiendo un esquema en bloques que permite conocer el comportamiento de cada uno de los elementos del sistema de secado. Estos bloques están interconectados por un conjunto de instrucciones de control que determinan el comportamiento general del mismo. (Figura 2). En general existen tres circuitos de circulación principales como se muestra en la Fig. 3. En el circuito 1 el aire circula a través del colector calentándose; luego pasa a través del acumulador en sentido directo y vuelve a entrar al colector cerrando el ciclo. Cuando está en funcionamiento el sistema 1, el acumulador de piedra se carga, mientras que la estufa es alimentada por medios convencionales, representados aquí por el circuito 3 (calentamiento eléctrico). En el circuito 2 el aire de la estufa se calienta circulando a través del acumulador en sentido inverso. Mientras funciona el sistema 2, los sistemas 1 y 3 no operan. Para el funcionamiento de la estufa está contemplada la posibilidad de que reciba un aporte de aire seco y salida de aire húmedo, según las necesidades de la etapa de secado en que se encuentre.

3.- Esquemas de Sistemas de Control

El sistema de control determina distintos modos de funcionamiento a través de un conjunto de instrucciones de decisión.

a) Si la radiación incidente sobre el colector, H , supera un cierto valor límite H_1 , el bloque "colector" calcula la temperatura del aire a la salida del mismo, T_1 y, si ésta es superior a T_{p1} , temperatura de las piedras en la parte superior del acumulador, el bloque "acumulador" calcula su funcionamiento en sentido directo, dando los perfiles finales de temperatura de las piedras y el aire al cabo de una hora. Durante este tiempo la estufa fue alimentada por el circuito 3. (Figura 3).

b) Si H es mayor que H_1 , pero la temperatura de salida del colector es inferior a las de las piedras en el acumulador, actúa el circuito 2 y el bloque "acumulador" calcula su funcionamiento en sentido inverso. Esto ocurre siempre que la temperatura del aire a la salida del acumulador, T_{a1} sea suficientemente alto para suministrar la energía necesaria para alimentar la estufa durante una hora. Esto significa que, no solo debe ser T_{a1} mayor que T_3 , sino que el tiempo durante el cual funciona el acumulador no debe ser mayor que 1 hora. Si todas estas condiciones no se cumplen el secadero se calienta con el método convencional.

c) Si la radiación incidente H es inferior al valor límite de funcionamiento del colector H_1 , y si la temperatura del aire a la salida del acumulador cumple las condiciones especificadas en (b), la estufa es alimentada por el acumulador que funciona en sentido inverso. De no ser así actúa el circuito 3.

El esquema de funcionamiento presentado no es el único. Se está estudiando otra posibilidad según la cual durante el día se acoplan los circuitos 1 y 2 (Figura 4). Esto es, el colector alimenta no solo el acumulador sino también la estufa, evitando de esta forma el calentamiento por medios convencionales durante las horas del día, lo que representa un apreciable ahorro de combustible.

A continuación se describe cada uno de los bloques que integran el programa.

4.- Radiación

Para predecir el funcionamiento del sistema lo primero que se necesita conocer es la radiación incidente sobre el colector, cuya superficie puede estar inclinada si es necesario, para optimizar su funcionamiento.

El cálculo se realiza a partir de valores promedio de radiación diaria sobre superficie horizontal, del día del año y de la latitud del lugar. También es necesario emplear valores de radiación total horaria (H_{th}) y radiación difusa horaria (H_{dh}) sobre superficie horizontal, determinados a partir de curvas publicadas por Liu y Jordan (3,4). Con el objeto de agilizar el cálculo estas curvas fueron ajustadas por medio de una expresión analítica del tipo $Y(x) = a x^b e^{cx}$.

El programa permite determinar también la declinación, la duración del día so

lar, la radiación diaria fuera de la atmósfera para esa localidad y la radiación total horaria incidente sobre una superficie inclinada, a partir de fórmulas extraídas de (4).

5.- Colector

Hasta que se obtengan más datos de la respuesta del prototipo que se está ensayando, se admite la siguiente aproximación lineal para la eficiencia de un colector:

$$\eta = a - \frac{b (T_1 - T)}{H}$$

donde T es la temperatura ambiente, y a y b son constantes determinadas experimentalmente. A partir de esta fórmula se puede calcular la temperatura a la salida del colector, T₁, mediante la siguiente expresión

$$T_1 = \frac{A_c}{\dot{m} c + b A_c} \left[a H + b T + \frac{\dot{m} c}{A_c} T_2 \right]$$

donde A_c es el área del colector, \dot{m} el caudal que circula por él, c es el calor específico del aire y T₂ la temperatura del aire a la entrada del colector. Esta última está dada por la temperatura del aire en el extremo inferior del acumulador. Este bloque permite conocer también la eficiencia del colector hora a hora por medio de la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_1 - T_2)}{H A_c}$$

6.- Acumulador

Como elemento acumulador se emplea un acumulador de piedras. Su comportamiento térmico está descrito por dos ecuaciones diferenciales parciales acopladas, que resultan de hacer un balance térmico en un elemento de volumen d v durante un tiempo d t:

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} + \alpha T_p = \alpha T_a$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} + \beta T_a = \beta T_p$$

donde T_a y T_p indican la temperatura del aire y de las piedras respectivamente y α y β son constantes.

Este sistema se resuelve por medio de un esquema en diferencias finitas que permite conocer los perfiles de temperaturas de las piedras y el aire en cada uno de los N intervalos Δt en que se divide el tiempo total de cálculo. En particular, permite conocer el estado final del acumulador al cabo de una hora.

Como condiciones de borde se emplea el perfil inicial de temperaturas en las piedras y la temperatura del aire a la entrada del acumulador, que se supone constante durante la hora de cálculo. Este último valor está dado por la temperatura del aire a la salida del colector, o la temperatura del aire en la estufa, según que actúen los circuitos 1 ó 2. El método numérico detallado se explica en (5).

7.- Tiempos de Calentamiento

Esencialmente, en un proceso de secado se requiere suministrar una cierta cantidad de energía durante un cierto intervalo de tiempo. La energía requerida depende de la etapa del proceso de secado (amarillamiento, secado, humectación, etc.) (1).

Dado que tanto el acumulador como el sistema de calentamiento eléctrico pueden suministrar una potencia determinada, es necesario conocer durante cuánto tiempo debe funcionar cada uno de ellos a lo largo de una hora, a fin de suministrar la energía requerida.

Esto se calcula realizando un balance térmico en la estufa, en el cual se tiene en cuenta los aportes (ya sean solares o convencionales), las pérdidas por conducción a través de las paredes, las pérdidas debidas a la salida de aire húmedo durante el proceso de secado y el calentamiento de la masa de tabaco. Los valores obtenidos nos indican el tiempo total que debe funcionar el sistema de calentamiento durante cada hora. El sistema real funcionará en forma intermitente, pero de modo tal que al cabo de una hora, el tiempo total durante el cual estuvo operando sea comparable con el valor calculado en el programa de simulación.

8.- Contenido de agua y entalpías

Con el fin de realizar el balance térmico mencionado en la sección anterior se necesita conocer el contenido de agua (w) y la entalpía de mezcla (i_g) del aire húmedo que entra a la estufa, ya sea desde el exterior o desde el acumulador y del que sale de ella.

Estas variables (w e i_g) se han calculado de dos modos distintos según el caso que se trate:

a) En el caso del aire que entra o sale de la estufa, los cálculos se hicieron sobre la base de pares de valores de temperatura de bulbo seco (T_{bs}) y bulbo húmedo (T_{bh}).

Los valores usados para el interior de la estufa fueron determinados experimentalmente sobre un prototipo. Los correspondientes al ambiente exterior

fueron aproximados sobre la base de registros obtenidos por el INTA en su estación de Cerrillos (Salta).

b) En el caso del aire que entra desde el acumulador (circuito 2), se admite que su contenido de agua no varía al circular a través del mismo siendo por lo tanto el valor ya calculado para el aire dentro de la estufa. La temperatura de bulbo seco se obtiene directamente al calcular el funcionamiento del acumulador (T_{al}), y con este valor se calcula la entalpía.

A los efectos de determinar w e i_g es necesario conocer previamente un conjunto de parámetros: presión de saturación de vapor a una dada temperatura ($P(t)$), humedad relativa (HR), entalpía de vaporización (ΔH_v), temperatura de saturación a la presión de trabajo (T_{sat}), los que pueden calcularse en forma analítica. Las fórmulas empleadas en el cálculo de w e i_g son las siguientes:

Contenido de agua:

$$w = \frac{0,622 \cdot HR \cdot P(T_{bs})}{P_{atmosf} - HR \cdot P(T_{bs})} \quad \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}}$$

Entalpía de la mezcla (aire seco + agua):

$$i_g = \left\{ T_{bs} + w \left[4 T_{sat} + \Delta H_v + 2 (T_{bs} - T_{sat}) \right] \right\} \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

Se hace notar que este bloque permite realizar cálculos psicrométricos en forma analítica, a cualquier altura respecto del nivel del mar, lo que puede ser de utilidad en relación con problemas de acondicionamiento ambiental u otros problemas de secado.

9.- Resultados

Se realizaron dos simulaciones del funcionamiento del secadero. Una en la que el calentamiento se realiza por medios eléctricos exclusivamente, y otra en la que se realiza tanto por vía solar como eléctrica, según que el sistema solar sea capaz o no de suministrar la energía necesaria. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5, curvas b y c respectivamente, y se comparan con una curva experimental de calentamiento puramente eléctrico (curva a). Se puede apreciar que el ahorro de consumo eléctrico es aproximadamente de un 32% (X Joules por Kg de tabaco seco obtenido).

Tanto la curva a como la b muestran un comportamiento similar, si bien en las primeras horas el consumo experimental es algo mayor que el calculado. Esto se debe posiblemente a pérdidas que no han sido tenidas en cuenta todavía en el acumulador. En la última etapa el calentamiento se realiza por medios eléctricos exclusivamente dado que la temperatura que hay que mantener en la estufa es demasiado alta para que el acumulador sea efectivo.

En la Figura 6 se muestra el consumo horario para la simulación de un secado realizado por medios convencionales (a), y la correspondiente a un secado por

vía solar (b).

Se pueden apreciar tres zonas: en la primera, que cubre hasta la hora 75 aproximadamente, la temperatura de la estufa es baja, puede ser alimentada por medios solares y el único consumo eléctrico se produce durante el día, en las horas en que funciona el colector. Estos picos de consumo diario se muestran claramente en la figura, mientras que la curva a muestra un comportamiento bastante parejo. El consumo eléctrico en esta etapa puede mejorarse cambiando el funcionamiento del sistema al esquema que muestra la Figura 4.

La segunda zona, comprendida entre las horas 75 y 100, corresponde a una etapa de temperatura moderada y gran evaporación en la estufa, y el consumo es más o menos el mismo tanto en la curva a como en la b. Esta etapa también puede mejorarse, cambiando las condiciones de control que determinan el funcionamiento del circuito 1 ó del 2 ($T_1 > T_{p1}$).

Finalmente la tercera zona, comprendida entre las horas 100 y 135, corresponde a una etapa de temperatura alta y baja evaporación, en la cual el sistema solar es insuficiente para suministrar la energía requerida, y el calentamiento se realiza por medios eléctricos, siendo el consumo el mismo en ambas curvas.

10.- Conclusiones

De lo expuesto se concluye que, si bien los resultados mostrados son los primeros obtenidos por medio de la simulación numérica planteada, indican en general que ésta puede constituir una útil herramienta de análisis del sistema de secado solar. Como se indicó en la sección anterior se piensa realizar varias mejoras en el programa; algunas ya están siendo estudiadas, otras surgirán del análisis de los próximos cálculos que se realicen. Con estas mejoras se espera tener mayores porcentajes de ahorro de energía convencional, al lograr un mayor reemplazo de calentamiento por vía solar.

11.- Agradecimiento

Estos trabajos fueron financiados en parte con fondos provenientes de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Nación.

12.- Referencias

- 1.- L. Saravia, A. Fabris, S. Guerrero y E. Alanís, "Secado de Tabaco con Energía Solar". Presentado en la 3° Reunión de Trabajo de ASADES. Mendoza - (1977).
- 2.- L. Saravia, Et Al, "Secado Solar de Tabaco. Resultados Experimentales", presentado en la 4° Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata (1978).
- 3.- B.Y.H. Liu y R.C. Jordan, "The interrelation ship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation", Solar Energy, Vol. 4, N° 3, pp: 1-19 (1960).

- 4.- I.A. Duffie y W.A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes" Wiley, New York (1974).
- 5.- L. Saravia, E. Alanis, I. De Paul y A. Castagnolo, "Simulación de sistemas que incluyen acumuladores de piedra". Presentado en la 3° Reunión de Trabajo de ASADES, Mendoza. (1977).

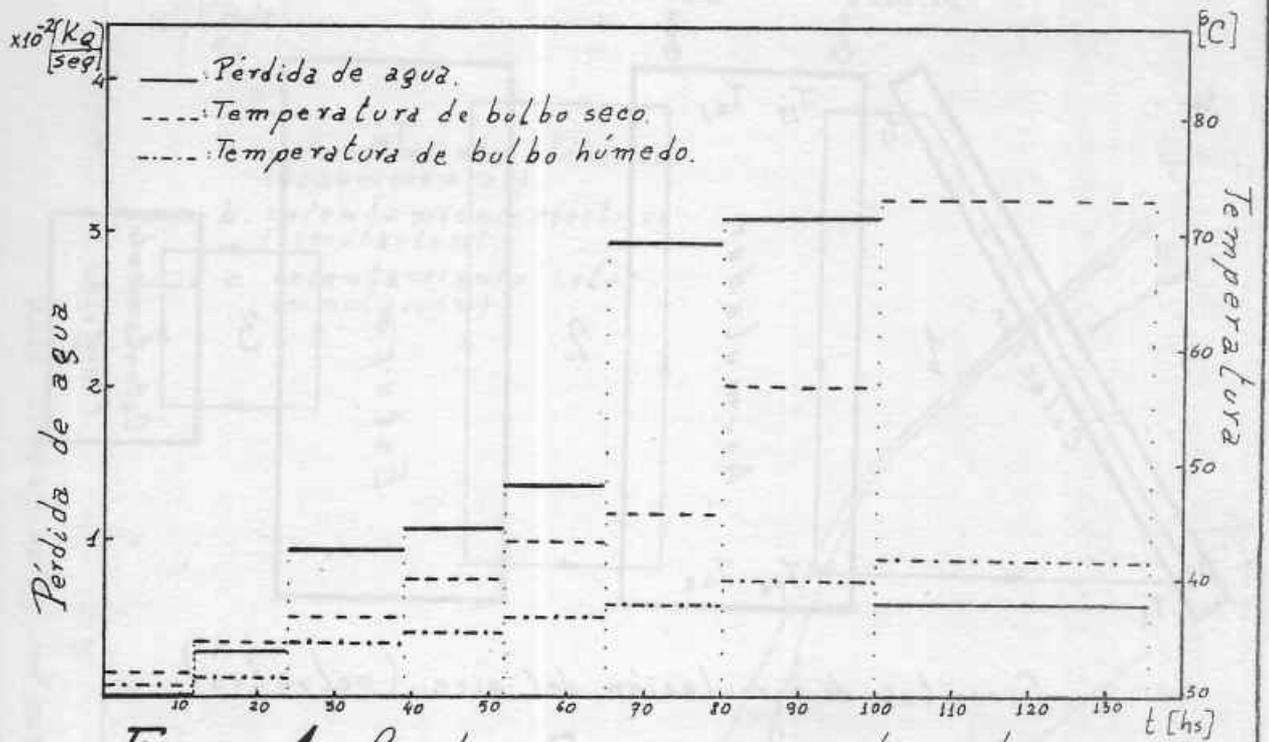


Figura 1 - Condiciones físicas en la estufa.

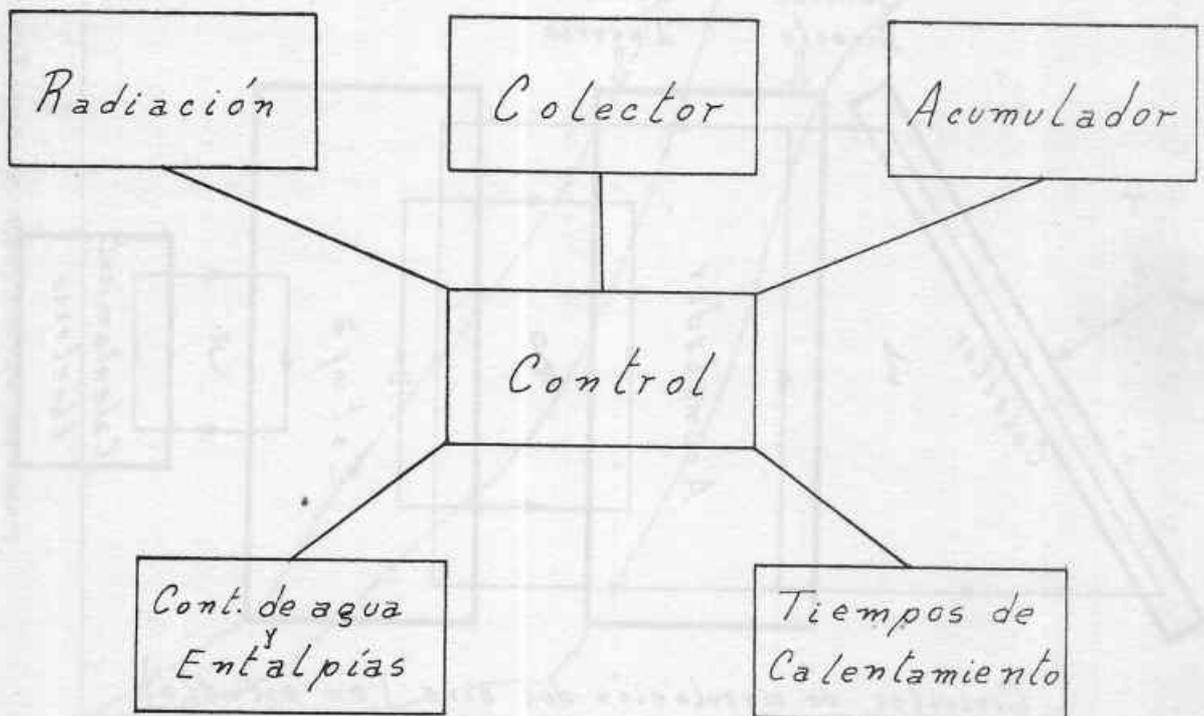
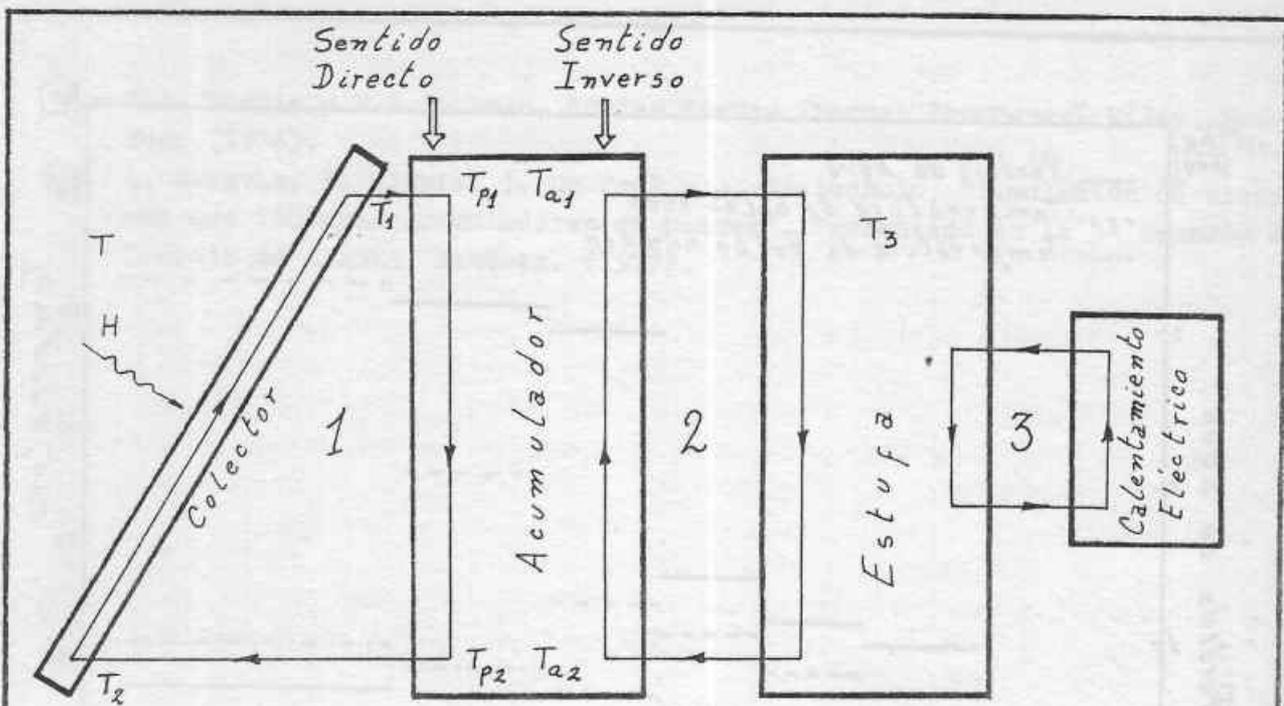
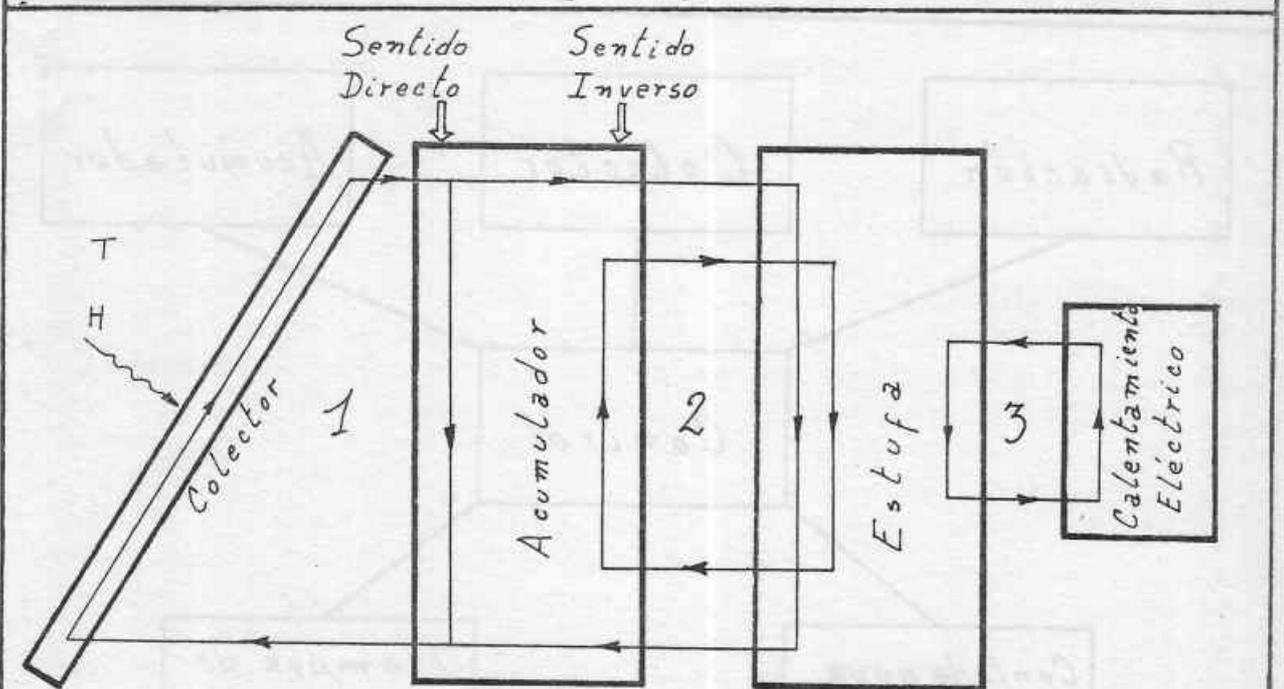


Figura 2 - Esquema de los bloques de simulación.



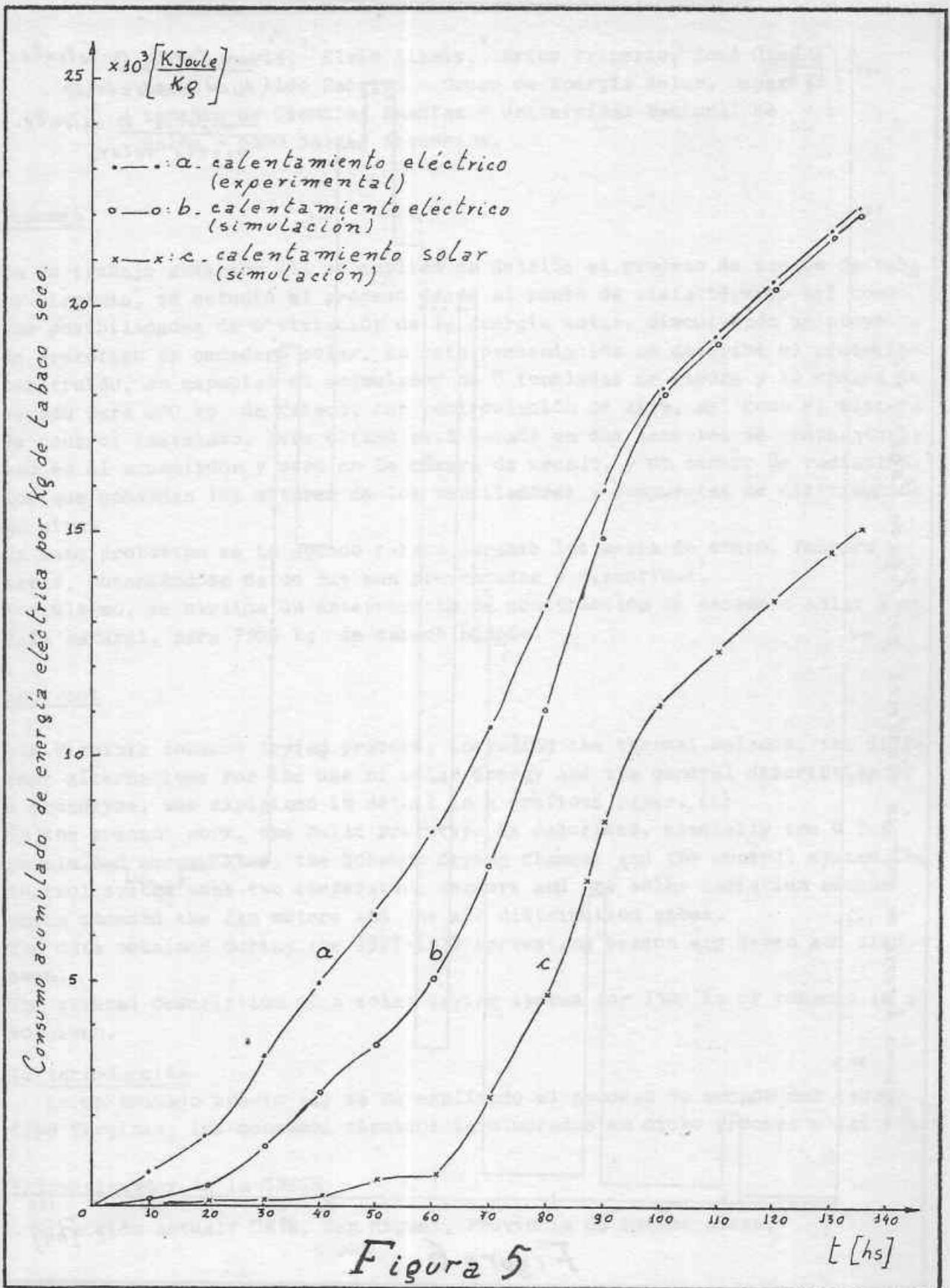
Circuitos de circulación del aire (actuales)

Figura 3



Circuitos de circulación del aire (en estudio).

Figura 4



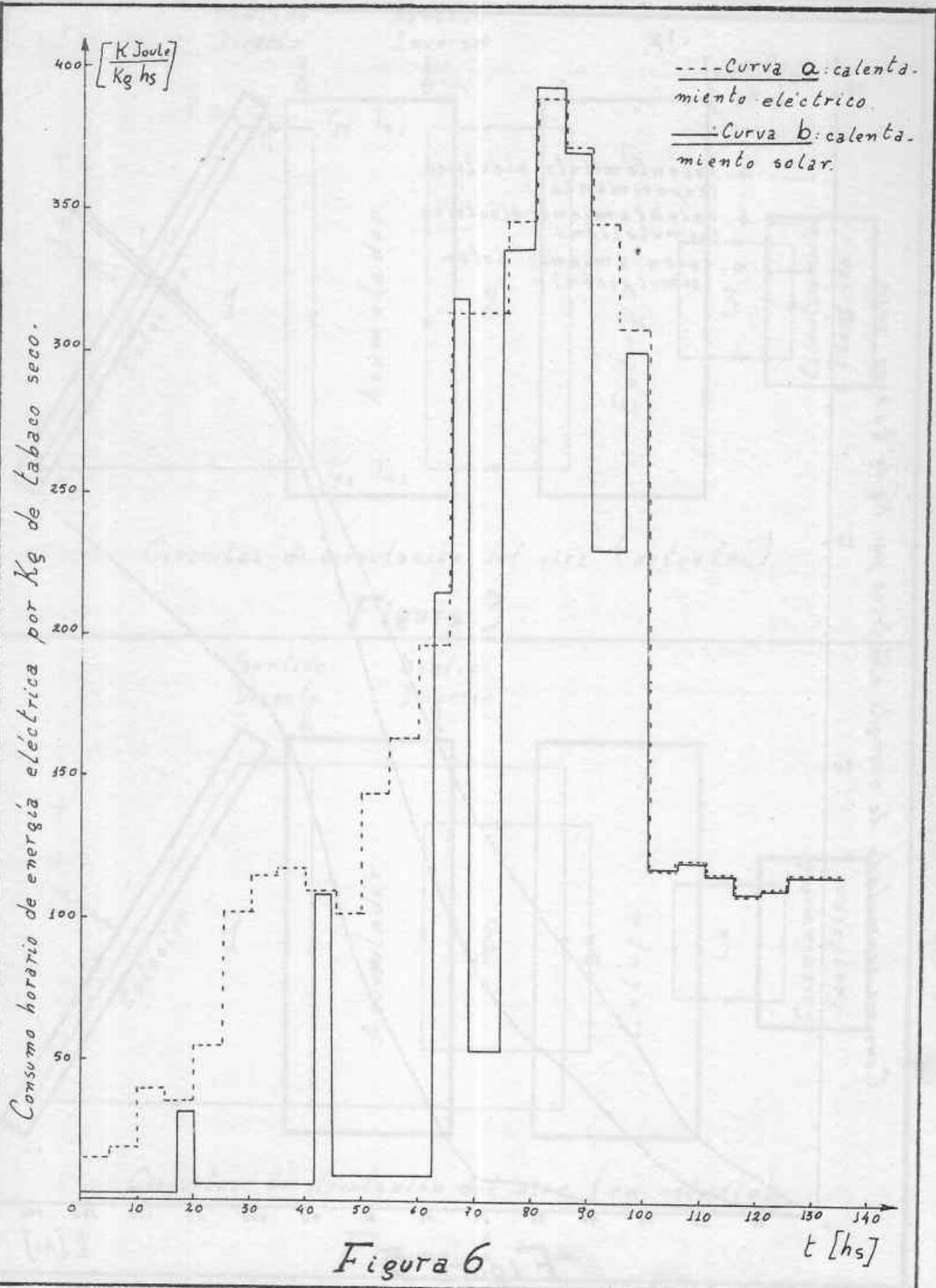


Figura 6