

OPERACIONES UNITARIAS

2023



TEMA 5 SECADO



SECADO

deshidratación

deseccación

secado

operación unitaria destinada a eliminar por evaporación o sublimación casi toda el agua presente

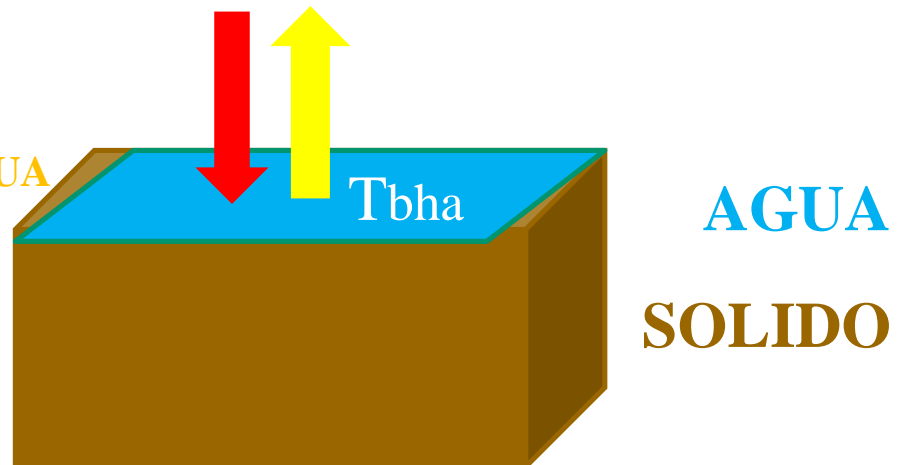
mediante la aplicación de calor bajo condiciones controladas

AIRE HUMEDO CALIENTE = AIRE+ VAPOR DE AGUA 

TRANSFERENCIA DE ENERGIA = Q

TRANSFERENCIA DE MASA = $V \cdot \text{AGUA}$

SOLIDO HUMEDO = SOLIDO + AGUA



SECADO

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa.

SECADO

METODOS EMPLEADOS

Los métodos industriales utilizados en la desecación de alimentos pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- a) Desecación con aire caliente. El calor se aporta, principalmente, por convección.
- b) Desecación por contacto directo con una superficie caliente. El calor se aporta, fundamentalmente, por conducción.
- c) Desecación por aporte de energía radiante, microondas o dieléctrica.
- d) Liofilización. El aporte de calor se realiza en condiciones de presión muy bajas de tal forma que el agua, previamente congelada, pasa al estado vapor.

SECADO

Contenido de humedad: El contenido en humedad de una sustancia se puede presentar basándose en «peso húmedo» (kilogramo de agua por kilogramo de producto húmedo), o en «peso seco» (kilogramo de agua por kilogramo de producto seco). Es este último el que más se usa en los cálculos de secado.

Humedad Libre: La humedad libre de una sustancia es el exceso de humedad sobre el contenido de **HUMEDAD DE EQUILIBRIO** a cualquier temperatura y humedad dada.

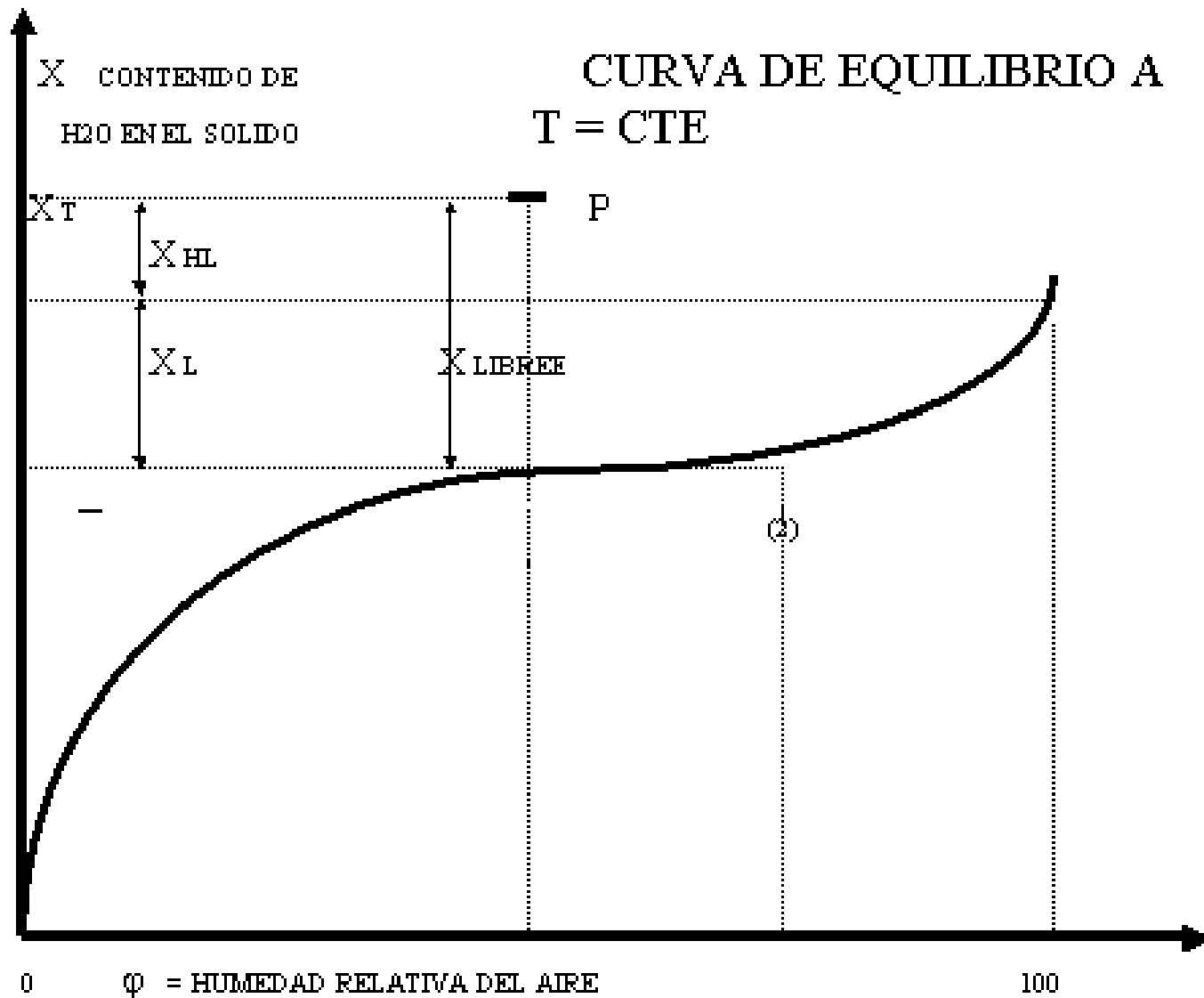
SECADO

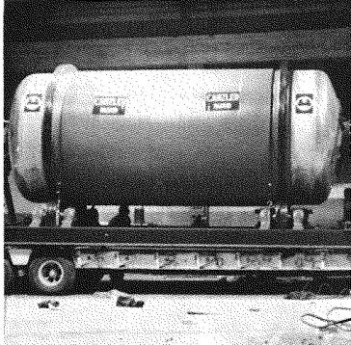
CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HUMEDA

$$\frac{\text{Kg. H}_2\text{O}}{\text{Kg. sólido húmedo}} = \frac{\text{Kg. humedad}}{\text{Kg. sólido seco} + \text{Kg. humedad}} =$$

$$\text{Hsh} = \frac{\text{Hss}}{1 + \text{Hss}} \cdot 100$$

SECADO





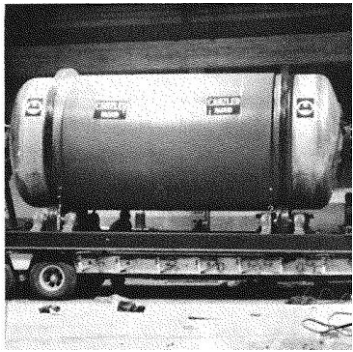
SECADO

TEORIA GENERAL DEL SECADO

La transferencia de calor se realiza, fundamentalmente, por convección o por conducción

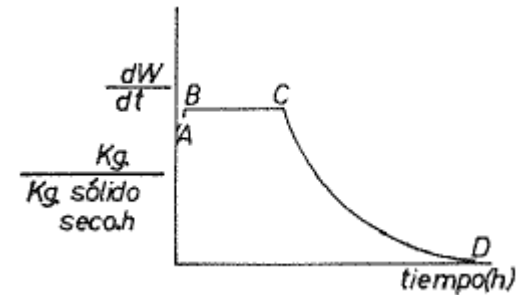
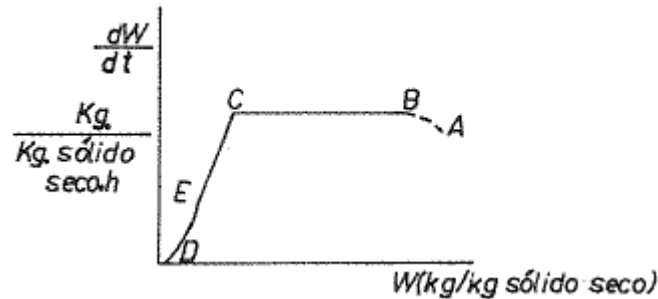
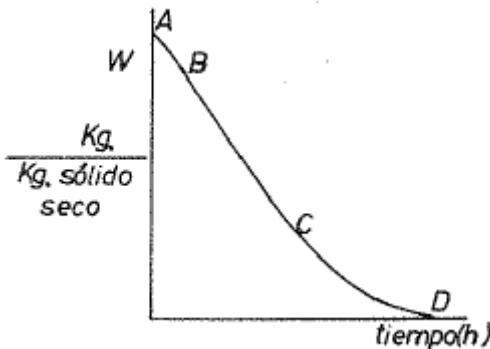
La transmisión por radiación es, salvo casos particulares especialmente diseñados, un efecto secundario que se da en todos los secaderos y que debe tenerse en cuenta, si se considera necesario, para corregir el mecanismo de transporte por convección o conducción

SECADO

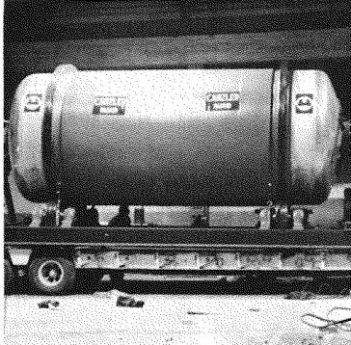


TEORIA GENERAL DEL SECADO

la representación gráfica del secado de un sólido húmedo en aire caliente a temperatura y humedad constante :

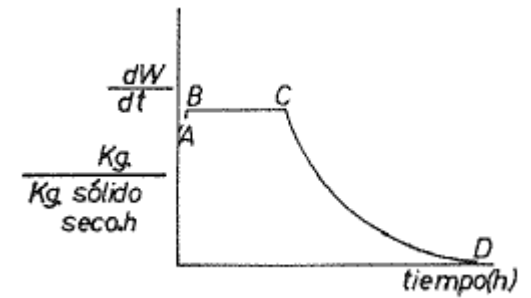
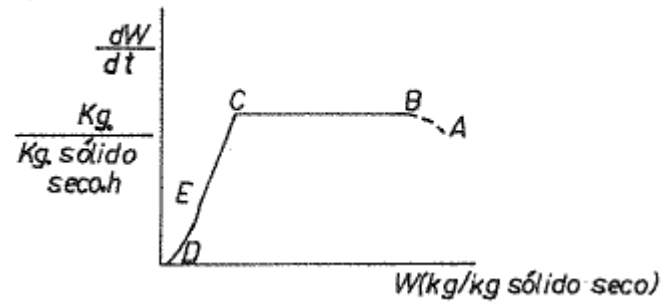
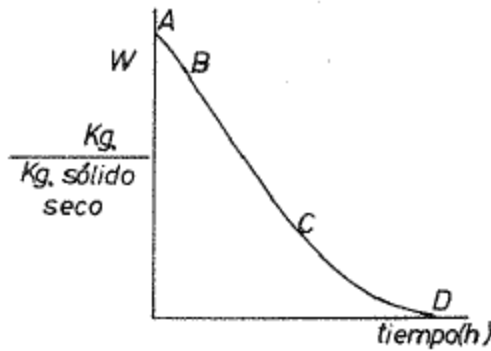


En el caso del secado por convección, el coeficiente de transferencia de calor es, relativamente, importante y no suele variar durante el desarrollo del secado por lo que la limitación de velocidad de secado está dada principalmente por el coeficiente de transferencia de materia



SECADO

TEORIA GENERAL DEL SECADO



Este hecho pone de relieve la existencia de dos o más etapas de secado que se denominan período o etapa de velocidad constante y período o etapa de velocidad decreciente la segunda y, en su caso, tercera y cuarta

SECADO

Período de estabilización

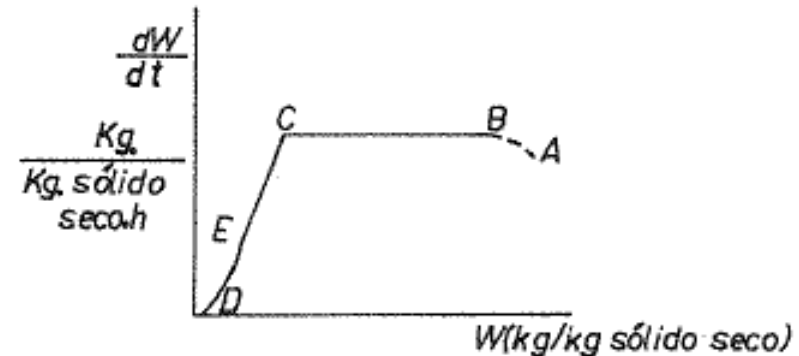
El período AB es el de estabilización durante el que las condiciones de la superficie del sólido se equilibran con las del aire de secado. Esta fase constituye una parte despreciable del tiempo total d

Período de velocidad constante

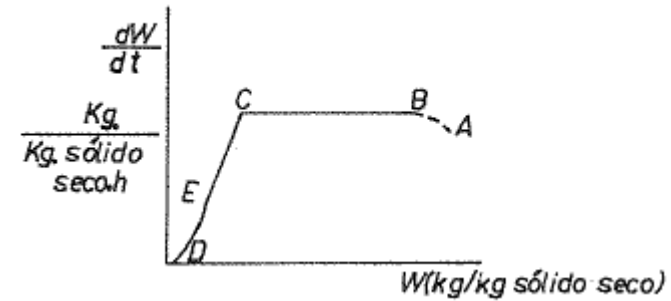
El período BC es de velocidad constante. La superficie del sólido se mantiene saturada de líquido. La velocidad de transferencia de materia se equilibra con la velocidad de transferencia térmica y la temperatura de la superficie permanece constante.

Cuando el calor se transmite fundamentalmente por convección, la temperatura de la superficie es la correspondiente a la de termómetro húmedo del aire de secado.

Cuando el calor se transmite, fundamentalmente, por conducción la temperatura de la superficie se sitúa entre la de termómetro húmedo y la de ebullición del líquido.



SECADO



En el caso de transmisi\u00f3n de calor, exclusivamente, por convecci\u00f3n, se verifica

$$\frac{dW}{dt} \cdot L = \frac{dQ}{dt}$$

$\frac{dW}{dt}$: velocidad de secado.

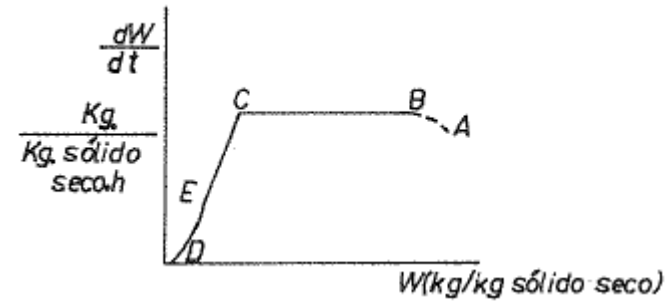
L : calor latente de evaporaci\u00f3n a la temperatura de la superficie.

$\frac{dQ}{dt}$: velocidad de transferencia de calor

Es decir

$$\text{Kg } A (H_s - H_a) \cdot L = h_c A (T_a - T_s)$$

SECADO



$$Kg A (H_s - H_a) \cdot L = h_c A (T_a - T_s)$$

Kg : coeficiente de transferencia de materia. ($Kg/m^2 h$ Kg vapor/
 Kg aire seco)

A : área de la superficie de desecación (m^2).

H_s : Humedad de saturación del aire a la temperatura de la
superficie. (Kg vapor/ Kg aire seco).

H_a : Humedad del aire (Kg vapor/ Kg aire seco).

h_c : Coeficiente de transferencia de calor $Kcal/h. m^{2o}. C$).

A : área de la superficie de transferencia de calor (m^2).

T_a : temperatura del aire ($^o C$).

T_s : temperatura de la superficie de desecación ($^o C$).

En el caso particular de aire-vapor de agua se verifica

$$Kg = \frac{h_c}{s}$$

Siendo:

s : calor húmedo del aire ($Kcal/Kg$ aire seco. $^o C$)

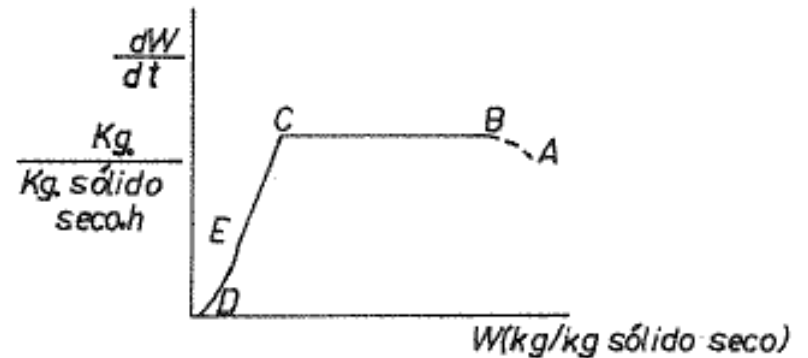
SECADO

En el caso de que el aire fluya paralelamente a la superficie del sólido puede tomarse como valor de h_c

$$h_c = 14,3 \cdot G^{0,8}$$

h_c : ($W/m^2 \cdot ^\circ K$).

G: velocidad másica del aire ($Kg/s m^2$).



En el caso de placas paralelas

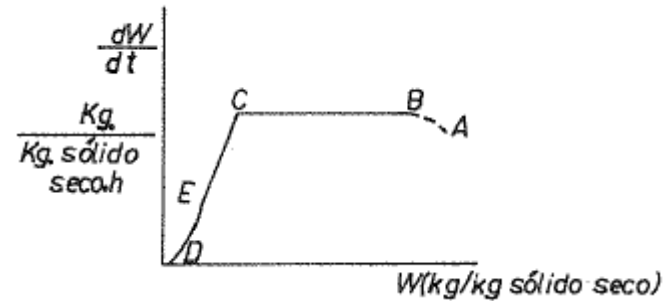
$$h_c = \frac{0,01 \cdot G^{0,8}}{D_c^{0,2}}$$

D_c : dimensión característica del sistema (pies).

G: velocidad másica del aire (libras/h pie^2).

h_c : ($B.t.u/h. pie^2. ^\circ F$).

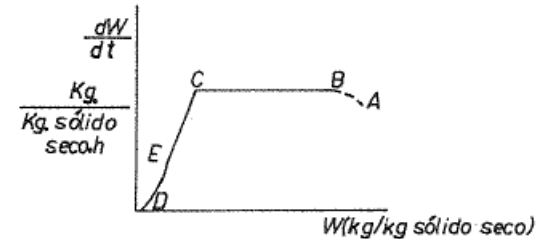
SECADO



Período de velocidad decreciente

El período CD corresponde al período de velocidad decreciente. El contenido de humedad del producto en el punto C se denomina, como se ha mencionado anteriormente, humedad crítica (W_c). A partir del punto C la temperatura de la superficie comienza a elevarse hasta aproximarse a la temperatura de bulbo seco del aire cuando el producto se ha desecado casi totalmente. Frecuentemente, este período consta de dos partes conocidas como primer y segundo períodos de velocidad decreciente, CE y ED respectivamente. A partir del punto E el plano de evaporación se desplaza penetrando hacia el interior del sólido y la velocidad de desecación decae más. Normalmente, los períodos de velocidad decreciente constituyen la mayor proporción de tiempo total de desecación.

SECADO



En el caso de que la difusión sea el fenómeno controlante (sólidos coloidales o geliformes) puede utilizarse la siguiente ecuación, válida para una lámina:

$$\frac{W - W_c}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \exp. \left[-D \cdot t \frac{\pi^2}{2d} \right]^2 + \frac{1}{9} \exp. \left[-9D \cdot t \frac{\pi^2}{2d} \right]^2 + \dots \right\}$$

W : contenido de humedad en un tiempo t .

W_c : contenido inicial de humedad suponiendo que es uniforme en toda la lámina.

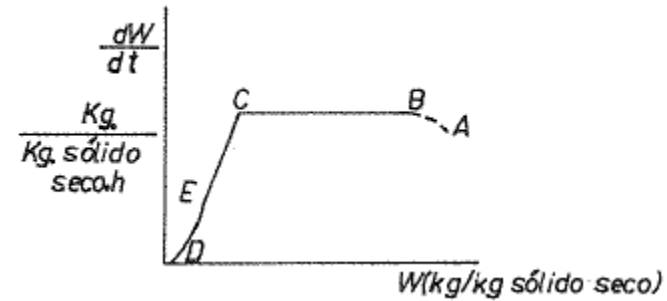
W_e : contenido de humedad de equilibrio del producto a la temperatura y humedad del aire.

d : mitad del espesor de la lámina (cuando la evaporación es por las dos caras). En caso contrario es el espesor total.

t : tiempo transcurrido desde el comienzo del período.

D : difusividad del líquido.

SECADO



Para grandes períodos de tiempo esta ecuación puede simplificarse de la forma

$$\frac{W - W_c}{W_c - W_c} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D \cdot t} \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2$$

válida para

$$\frac{D \cdot t}{d^2} > 0,1$$

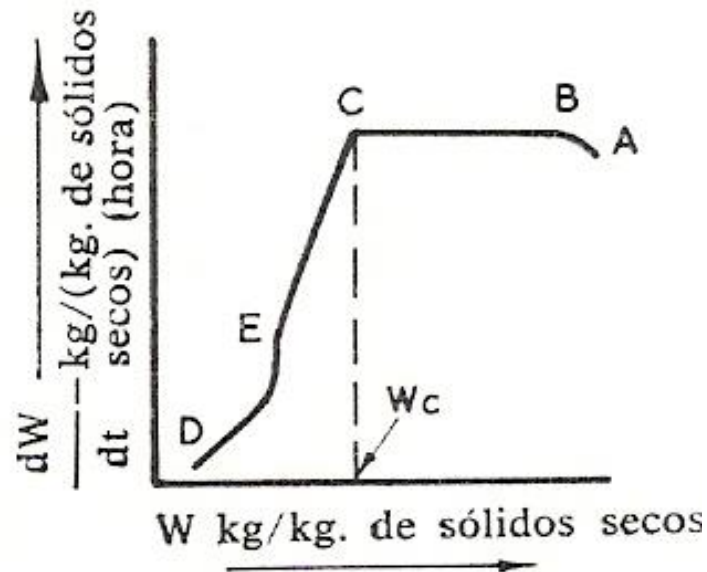
SECADO

MECANISMO DE SECADO

$$V = \frac{m}{S} \cdot \frac{dW}{dt}$$

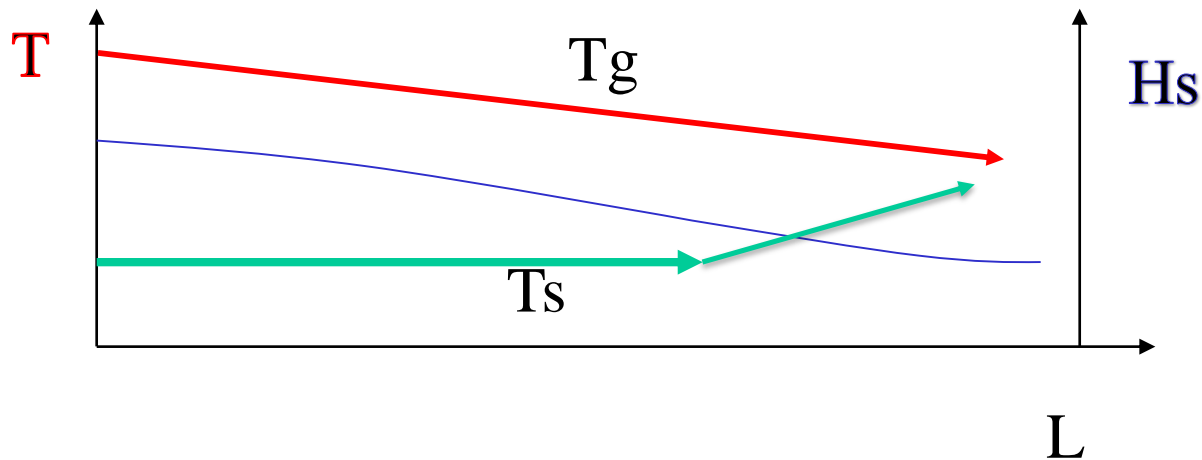
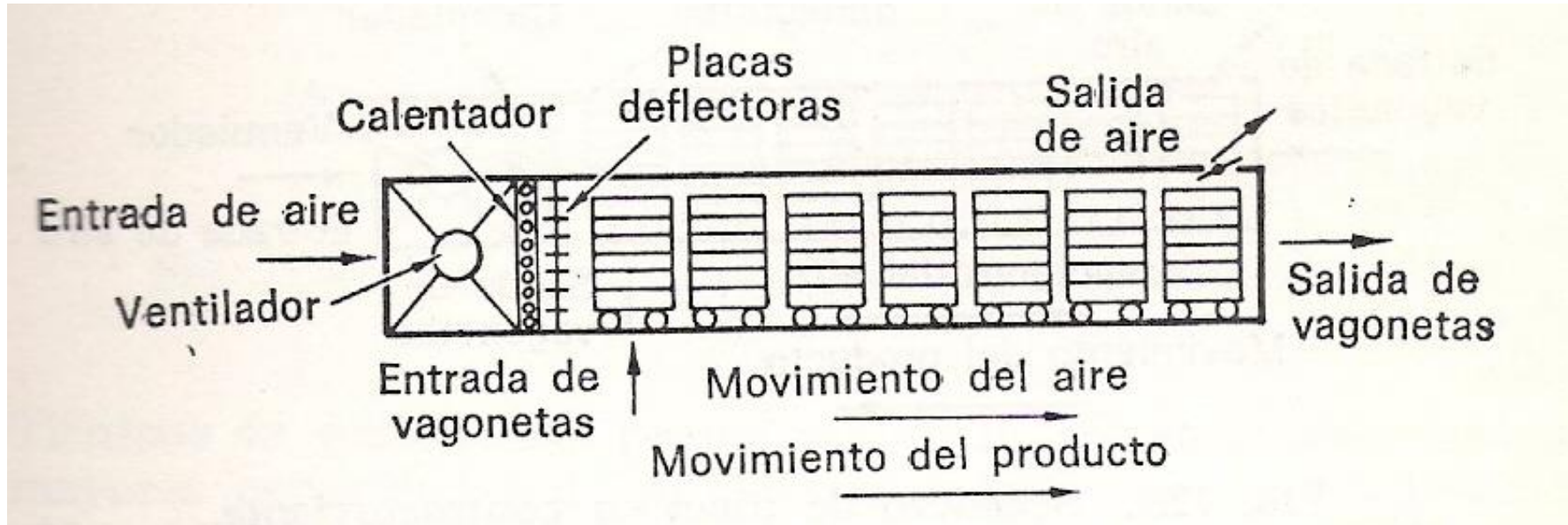
Kg. liquido evaporado

m² . h



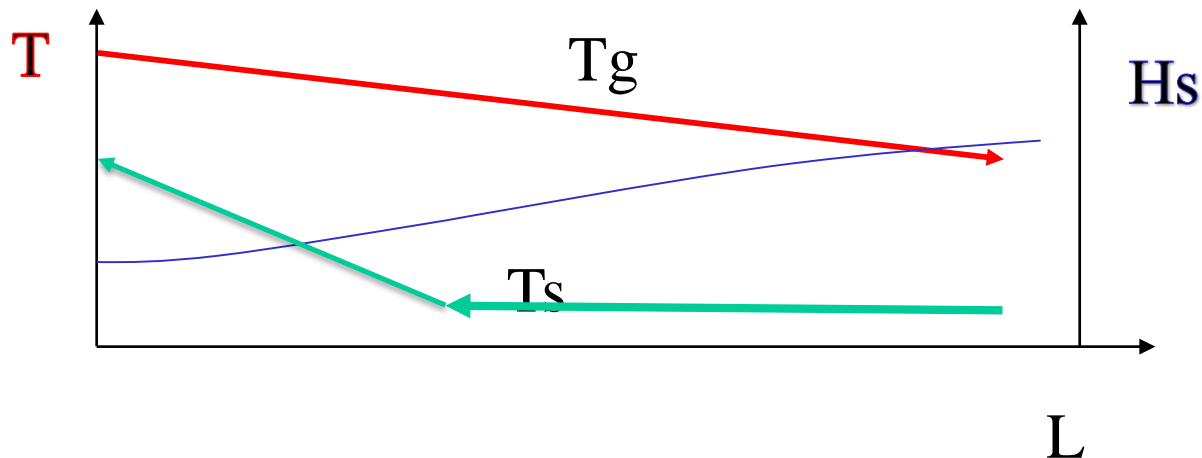
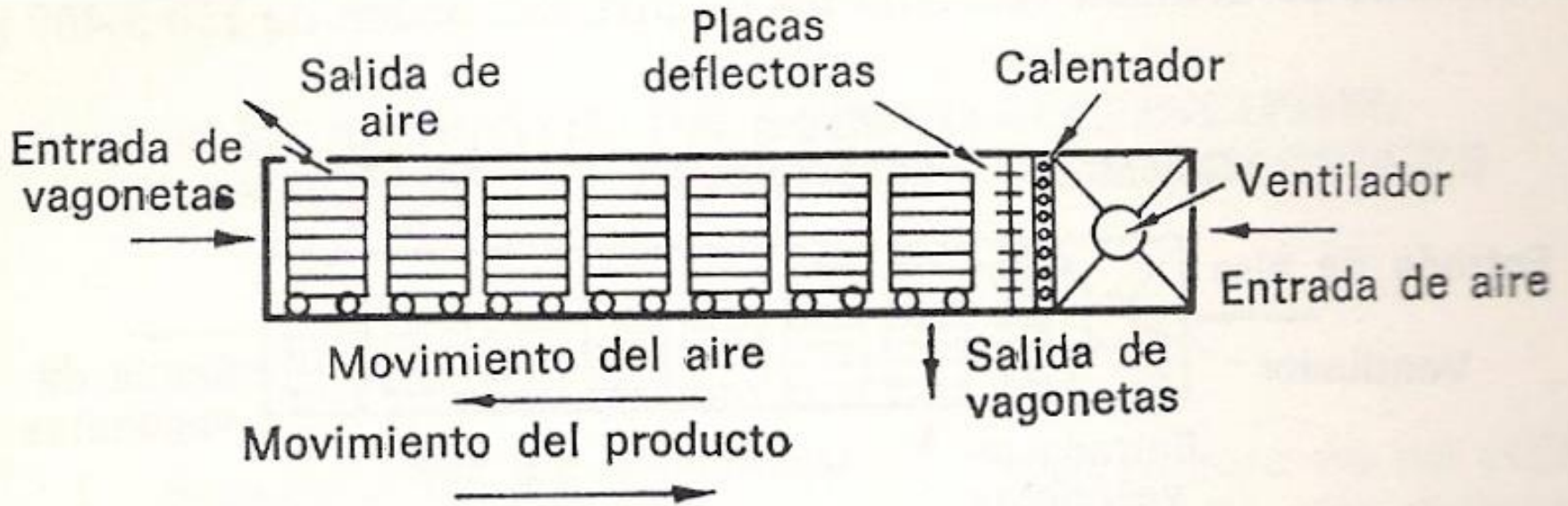
SECADO

SECADERO DE TUNEL EN PARALELO



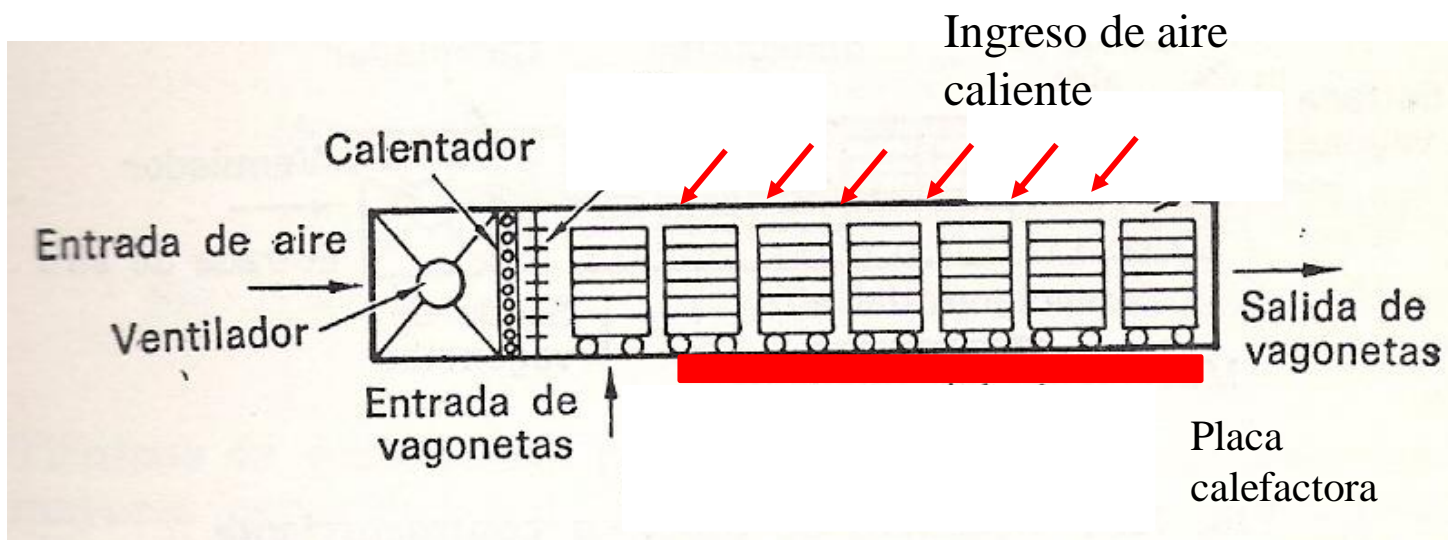
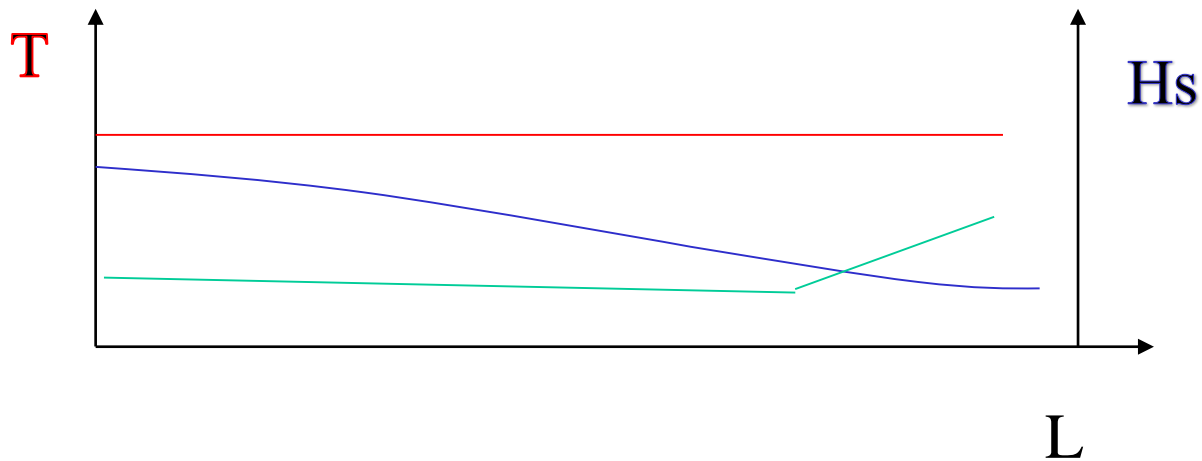
SECADO

SECADERO DE TUNEL EN CONTRACORRIENTE



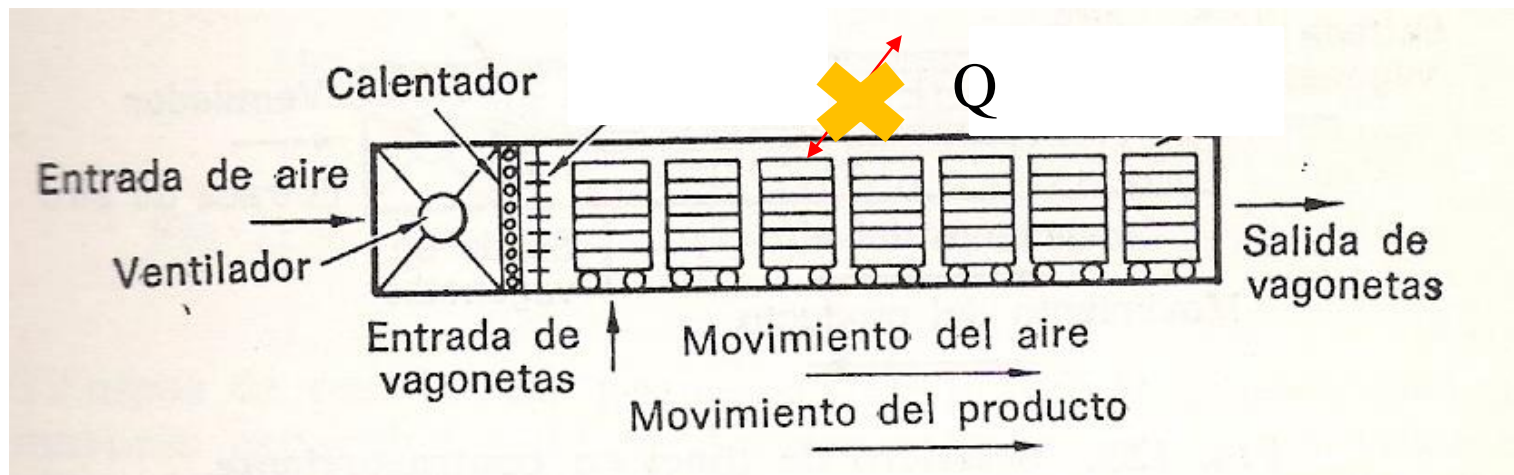
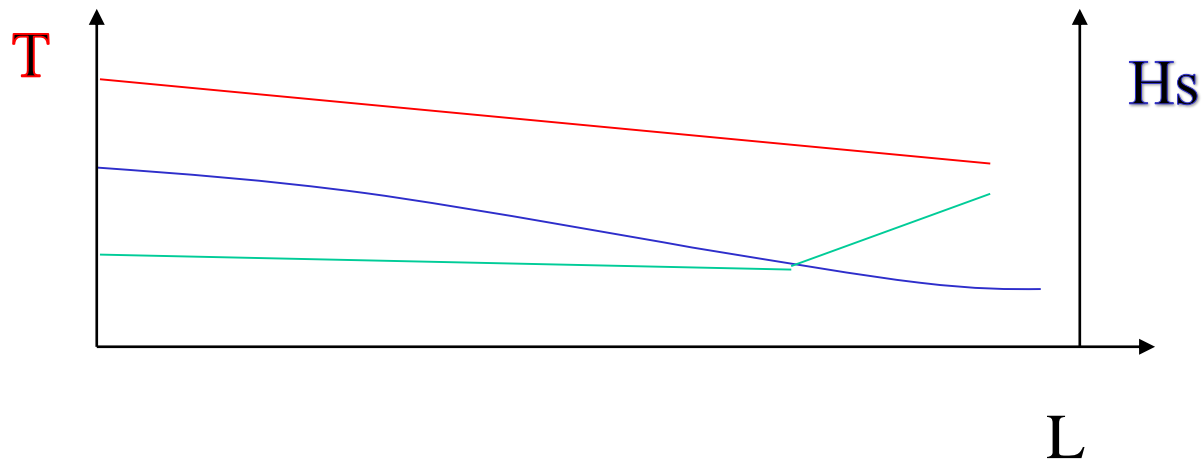
Secado isotérmico

La temperatura del aire del secadero se mantiene constante



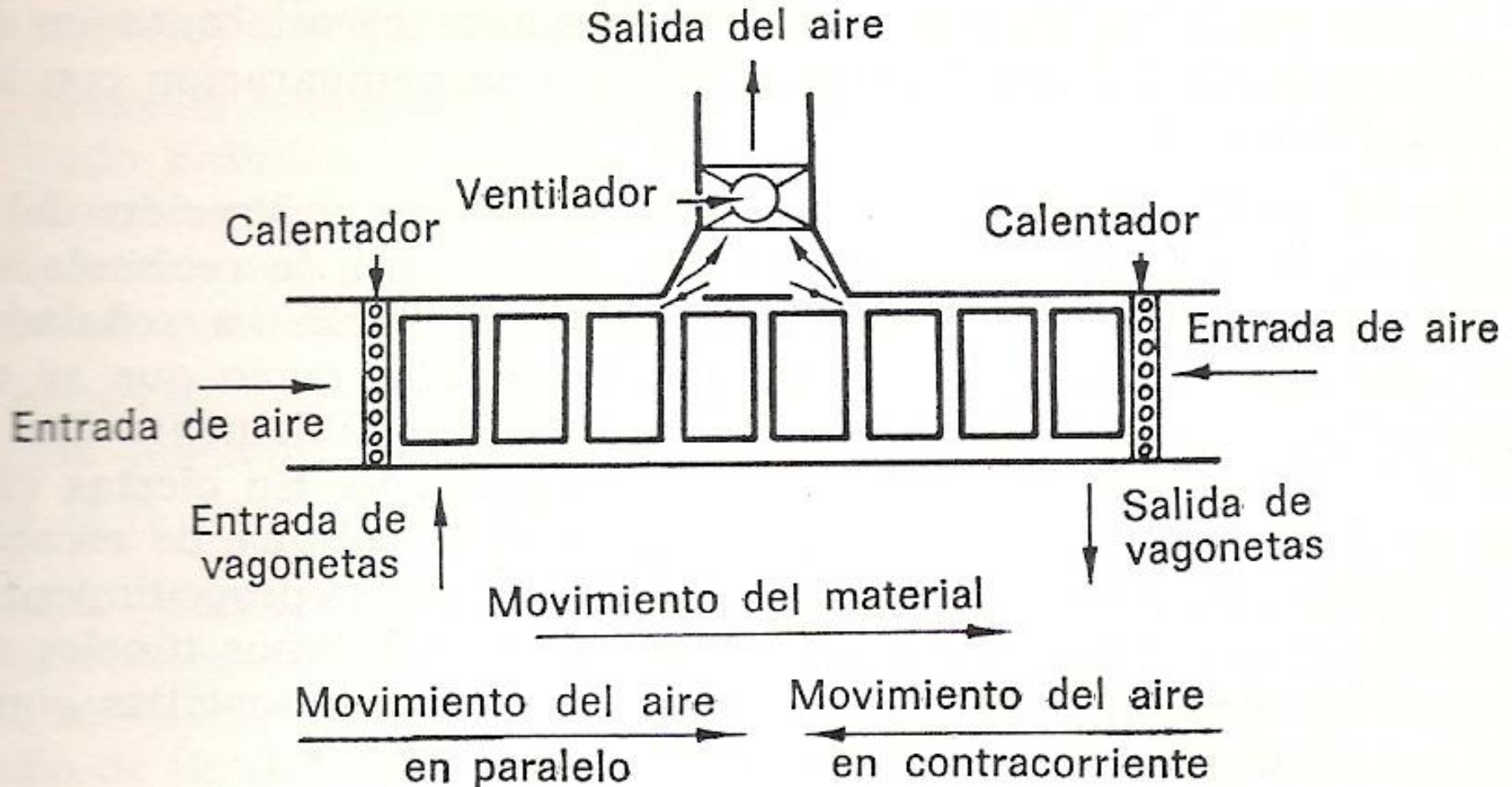
Secado adiabático

No hay intercambio de calor entre el sistema túnel-sólido y la temperatura del aire del secadero desciende



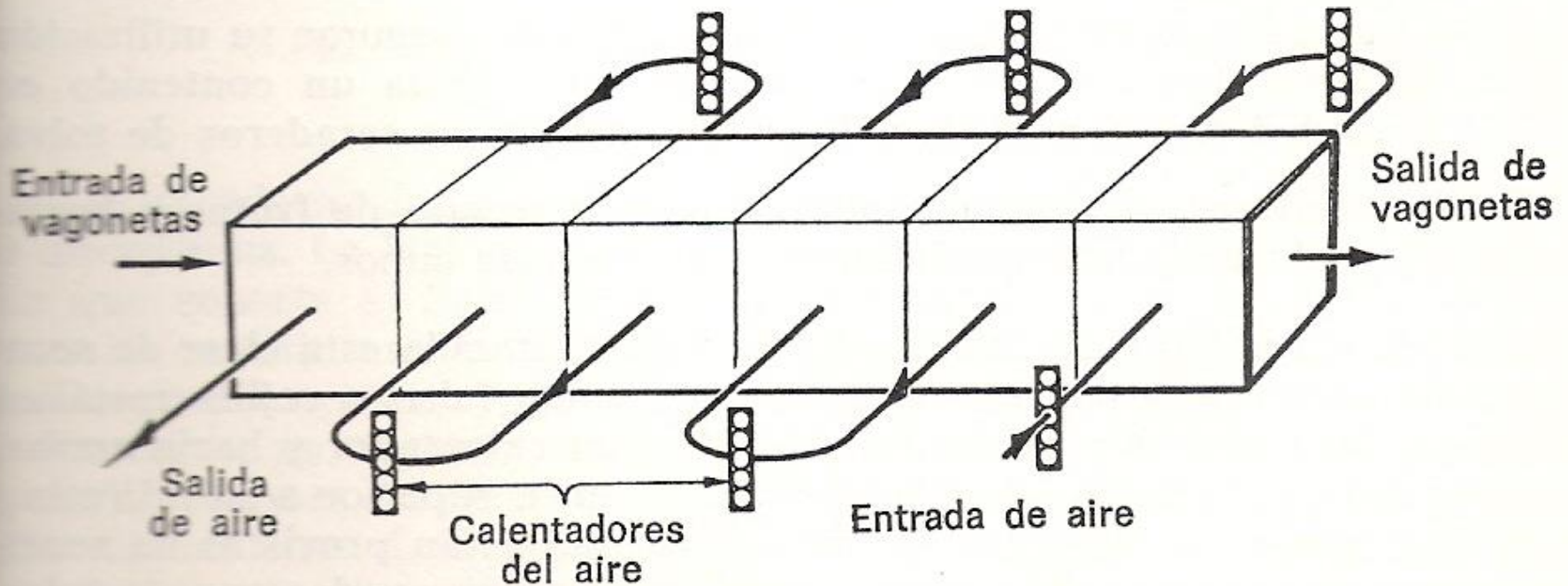
SECADO

SECADERO DE TUNEL CON DESCARGA CENTRAL



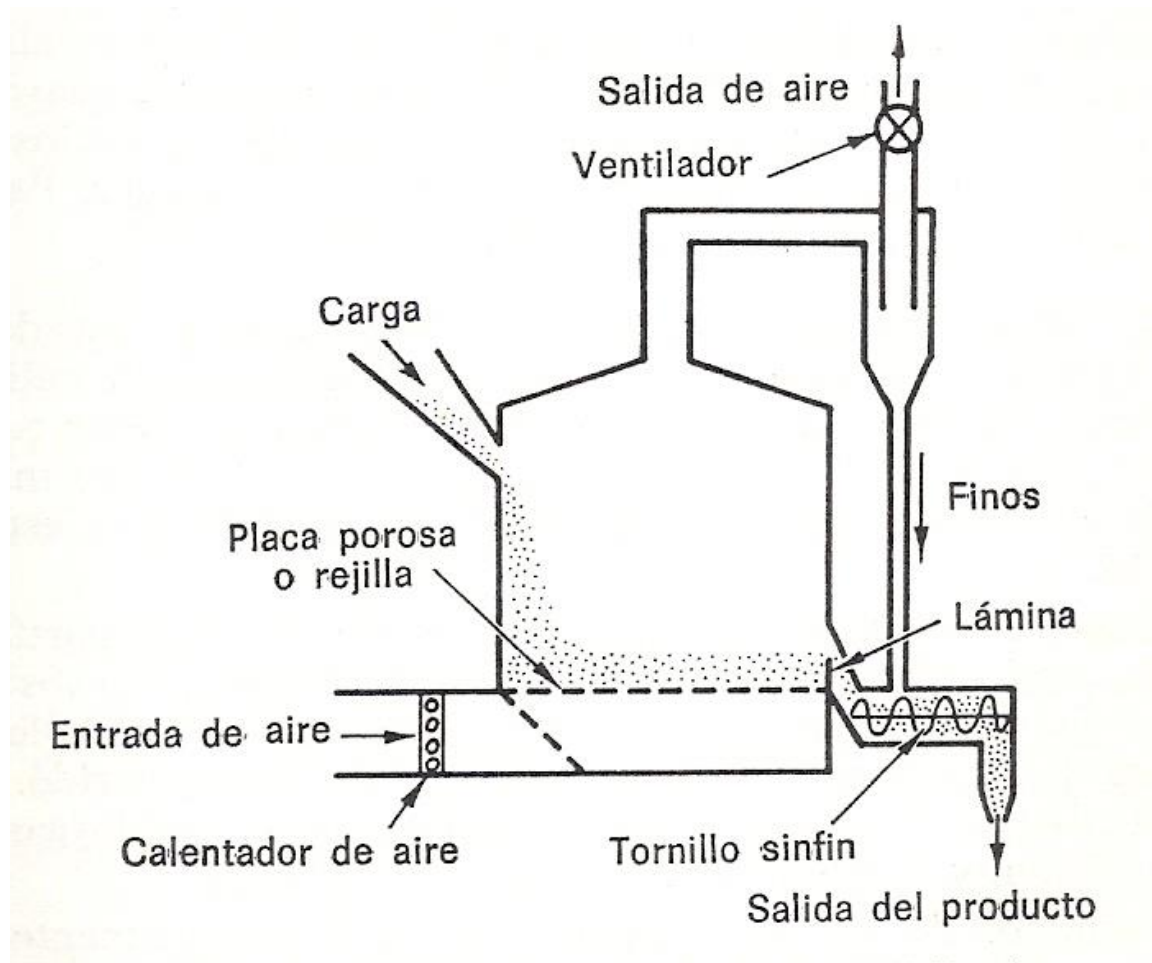
SECADO

SECADERO DE TUNEL DE FLUJO CRUZADO



SECADO

SECADERO CONTINUO DE LECHO FLUIDIZADO



SECADO



SECADERO TERMICO ROTATIVO

SECADO



SECADERO TERMICO ROTATIVO

SECADO

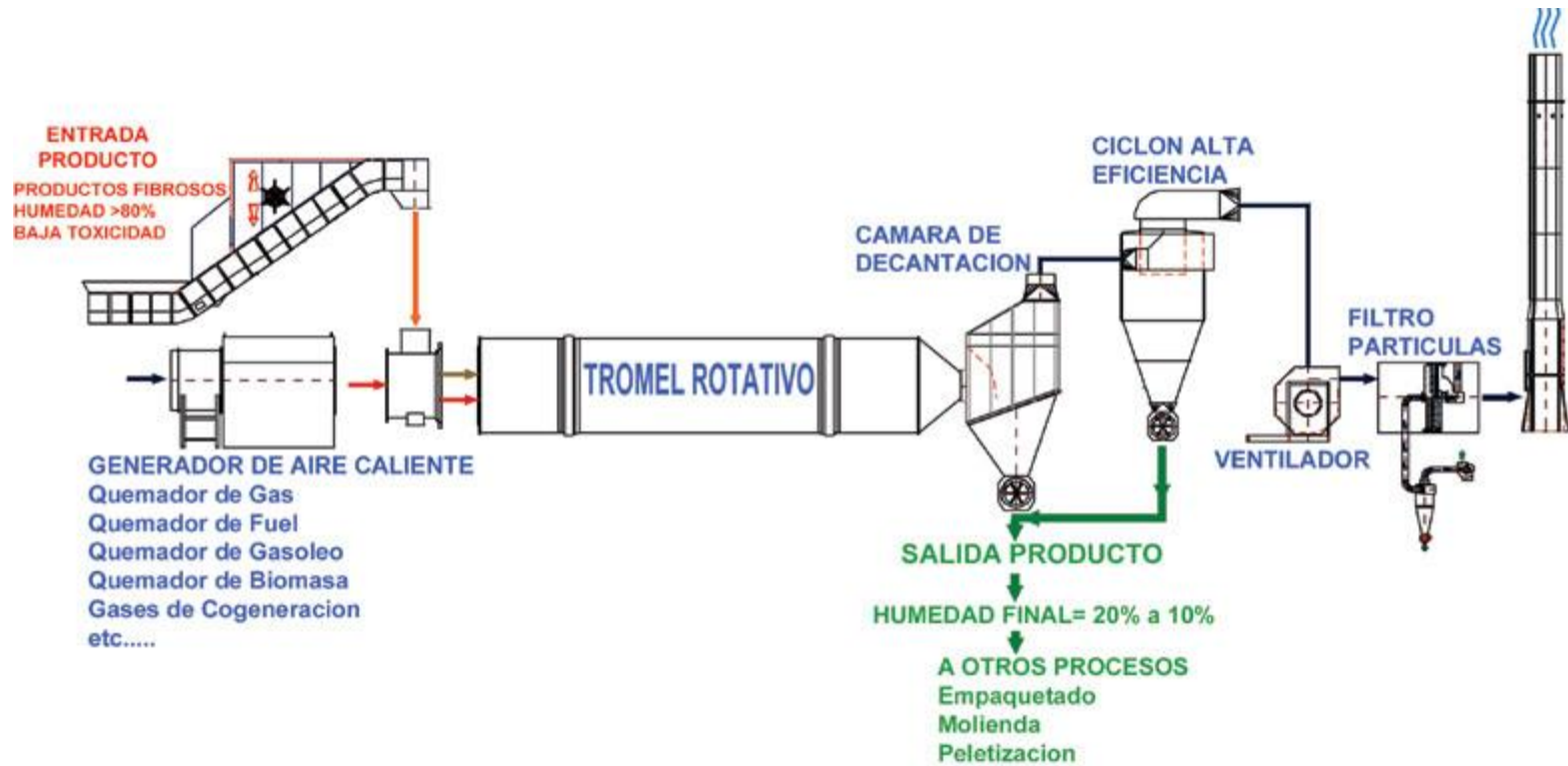


DIAGRAMA SECADERO TERMICO ROTATIVO DIRECTO

SECADO

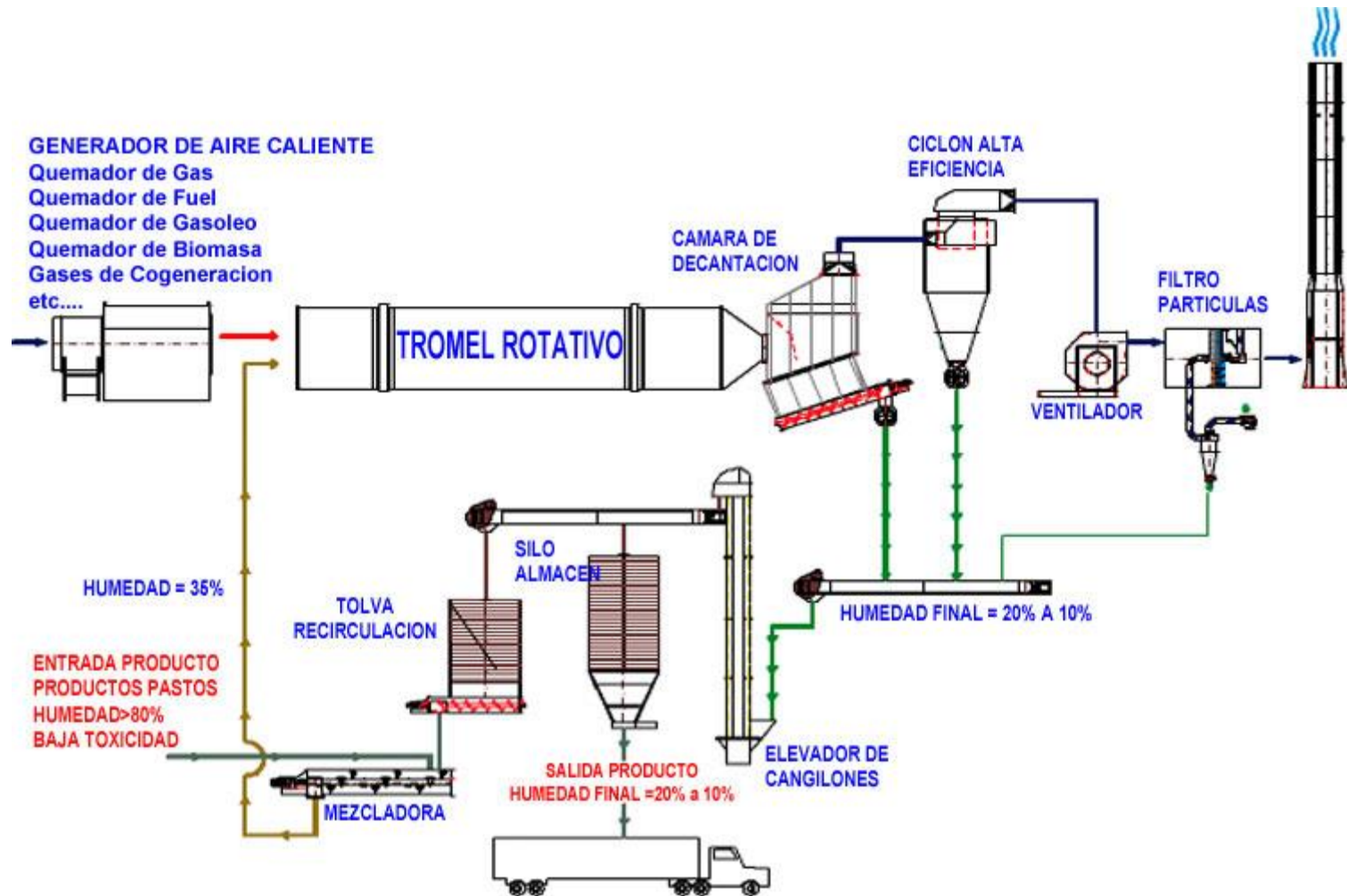
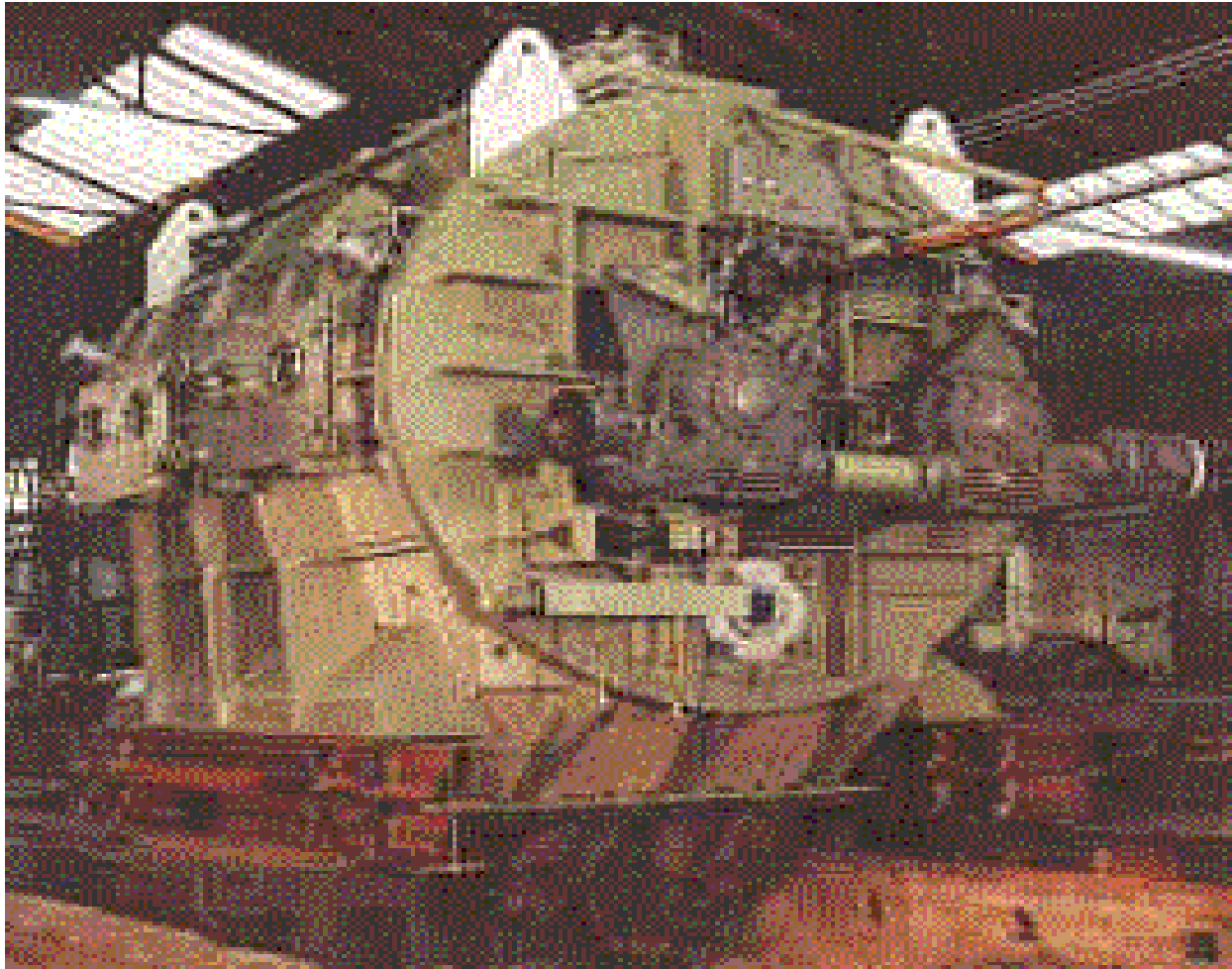


DIAGRAMA SECADERO TERMICO ROTATIVO DIRECTO CON RECIRCULACION

SECADO



SECADERO DE CILINDRO AL VACIO

SECADO

Para el secado de productos líquidos, melosos y pastosos que requieren tratamiento térmico cuidadoso.



Calentamiento indirecto con agua caliente, vapor o aceite térmico.

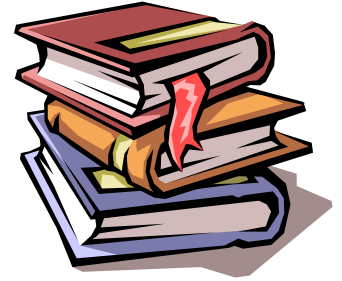
Condensación del líquido evaporado.

Control exacto de la temperatura y del tiempo de residencia del proceso.

Transmisión de calor elevada debido a la capa de producto muy delgada sobre la superficie de los cilindros, resultando tiempos de secado muy cortos de tan solo breves segundos.

SECADERO DE CILINDRO AL VACIO

BIBLIOGRAFIA



- **Apuntes de la cátedra de Operaciones Unitarias.**
- **Operaciones Básicas de Ingeniería Química. McCabe-Smith Harriot.**
- **Elementos de Ingeniería Química. Vian-Ocon.**
- **Manual del Ingeniero Químico. Perry y otros.**
- **Operaciones de Separación en Ingeniería Química. Pedro J. Martinez de la Cuesta.**



Los Profesores de la Cátedra OPERACIONES UNITARIAS

**i Agradecemos
su asistencia !**