

# **OPERACIONES UNITARIAS**

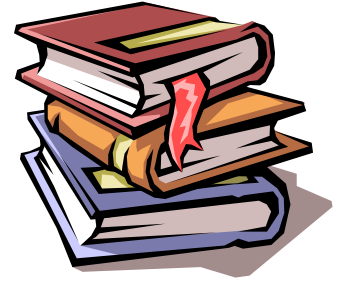
**2023**

---

***TEMA 5b SECADO***

# BIBLIOGRAFIA

---

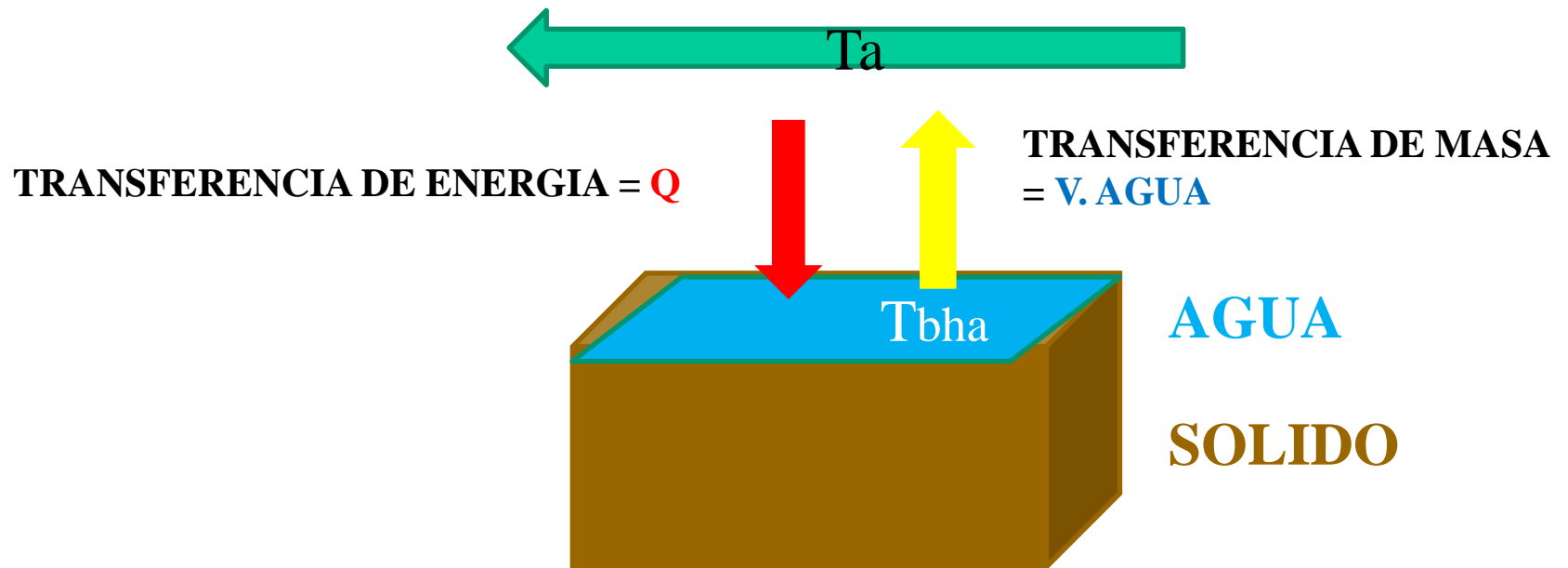


- **Apuntes de la cátedra de Operaciones Unitarias.**
- **Operaciones Básicas de Ingeniería Química. McCabe-Smith Harriot.**
- **Elementos de Ingeniería Química. Vian-Ocon.**
- **Manual del Ingeniero Químico. Perry y otros.**
- **Operaciones de Separación en Ingeniería Química. Pedro J. Martinez de la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

# SECADO

Es una operación unitaria destinada a eliminar por evaporación o sublimación el agua presente en un sólido, líquido no acuoso o gas mediante la aplicación de calor bajo condiciones controladas

**AIRE HUMEDO CALIENTE = AIRE+ VAPOR DE AGUA**



**TRANSFERENCIA DE ENERGIA = Q**

**TRANSFERENCIA DE MASA = V.AGUA**

**AGUA**

**SOLIDO**

**SOLIDO HUMEDO = SOLIDO + AGUA**

# SECADO

Los métodos industriales utilizados en la desecación de alimentos se pueden clasificar

- a) Desecación por aire caliente: convección
- b) Desecación por contacto: conducción
- c) Desecación por energía radiante, microondas o dieléctrico
- d) Liofilización: evaporación a baja presión de un líquido congelado

# SECADO

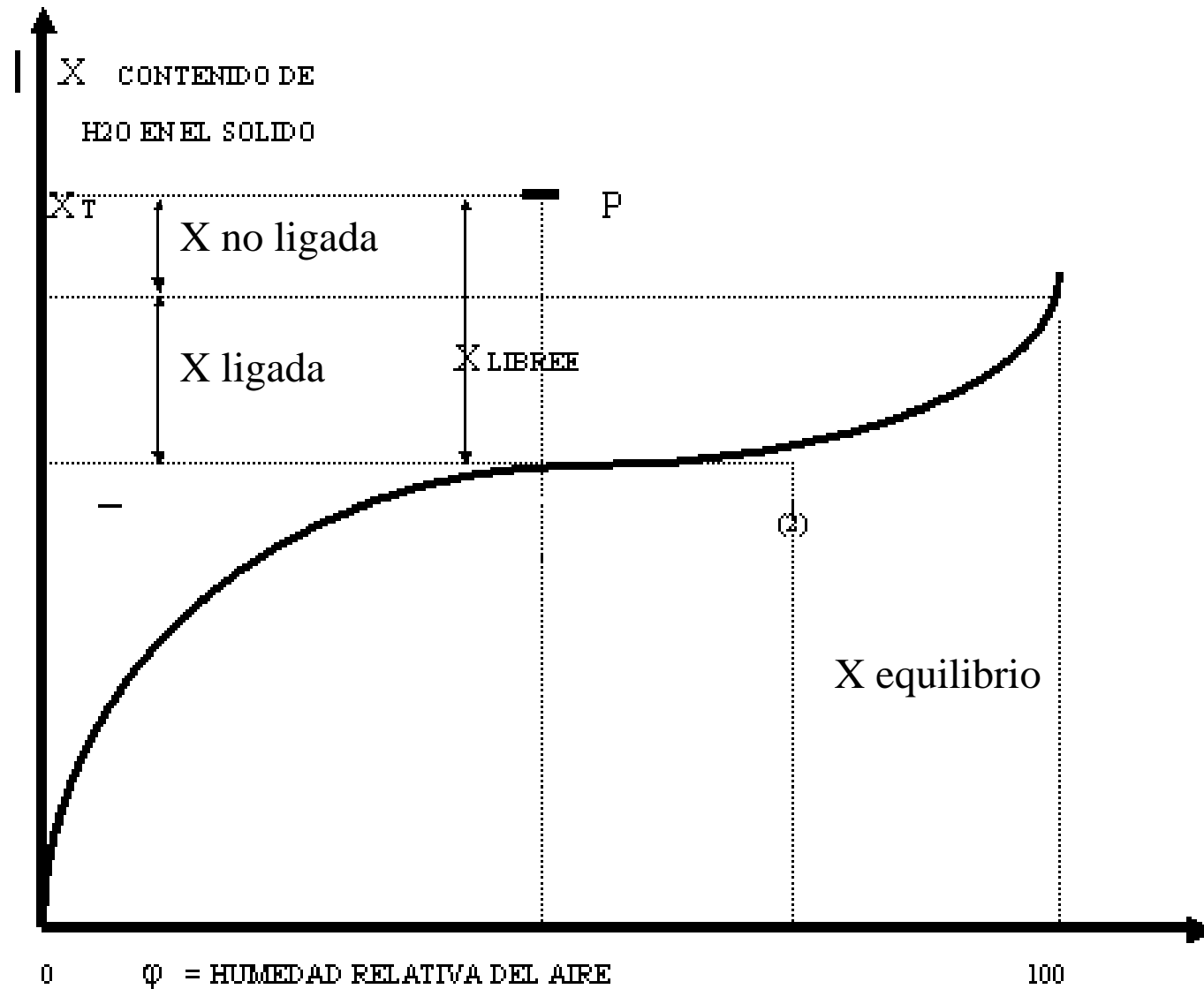
**Contenido de humedad:** El contenido en humedad de una sustancia se puede presentar basándose en «peso húmedo» (kilogramo de agua por kilogramo de producto húmedo), o en «peso seco» (kilogramo de agua por kilogramo de producto seco). Es este último el que más se usa en los cálculos de secado.

**Humedad de equilibrio:** es la humedad que no puede ser retirada del sólido al salir del secadero porque el aire ingresa con una cierta humedad y es similar a la humedad del mismo.

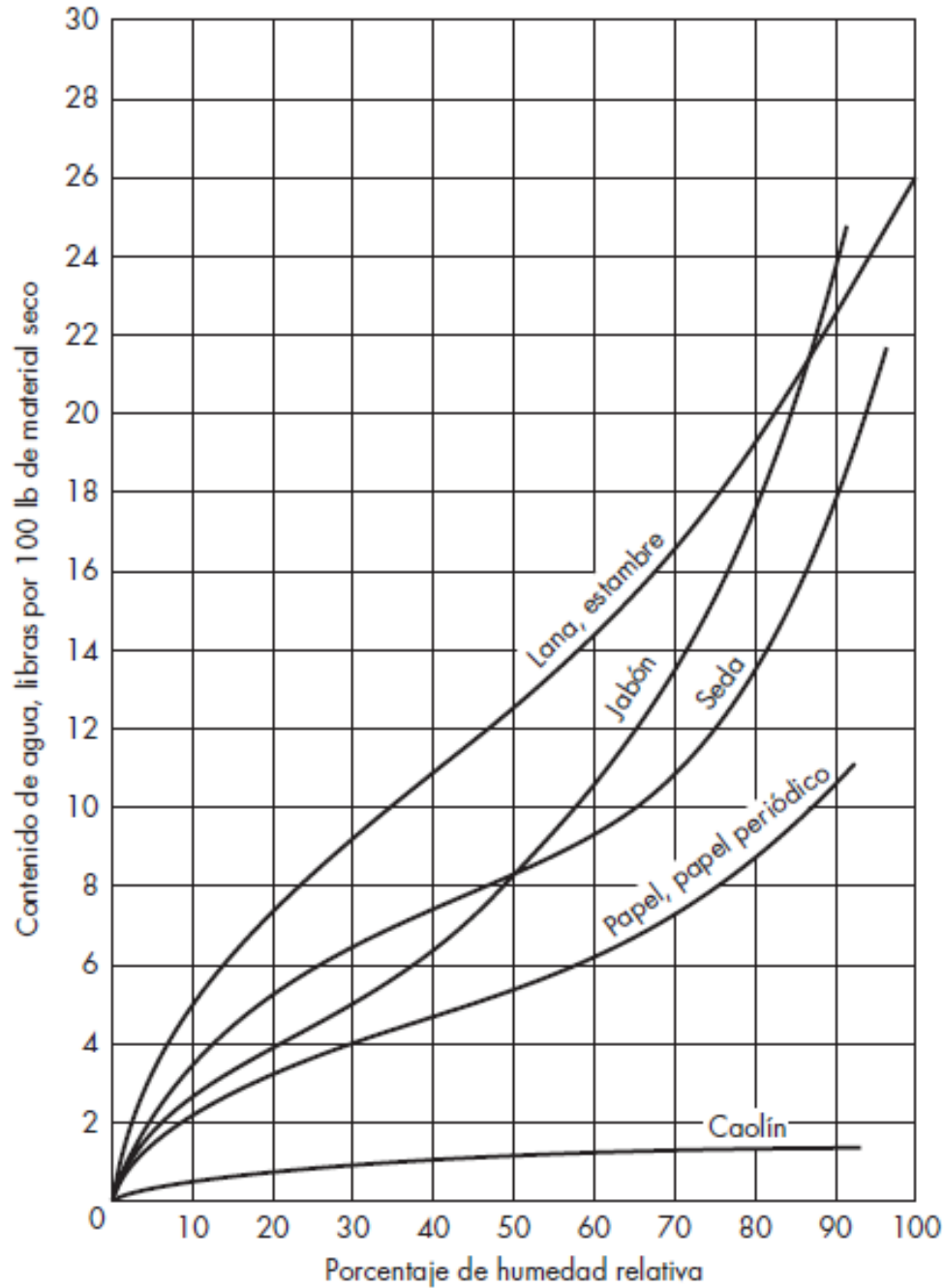
**Humedad Libre:** La humedad libre de una sustancia es el exceso de humedad sobre el contenido de HUMEDAD DE EQUILIBRIO a cualquier temperatura y humedad dada.

# SECADO

## CURVA DE EQUILIBRIO A T= CTE



# CURVAS DE EQUILIBRIO A 25 °C DE DISTINTOS MATERIALES



# SECADO : teoría general

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

La transferencia por radiación es un efecto secundario que se da en los secaderos y que debe tenerse en cuenta si se considera necesario para corregir el transporte por convección o conducción.

Hay casos especialmente diseñados en donde el secado se produce por radiación

## VELOCIDAD DE SECADO

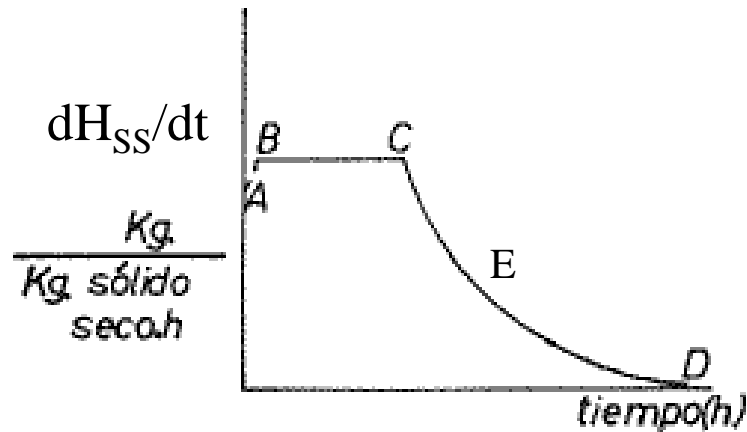
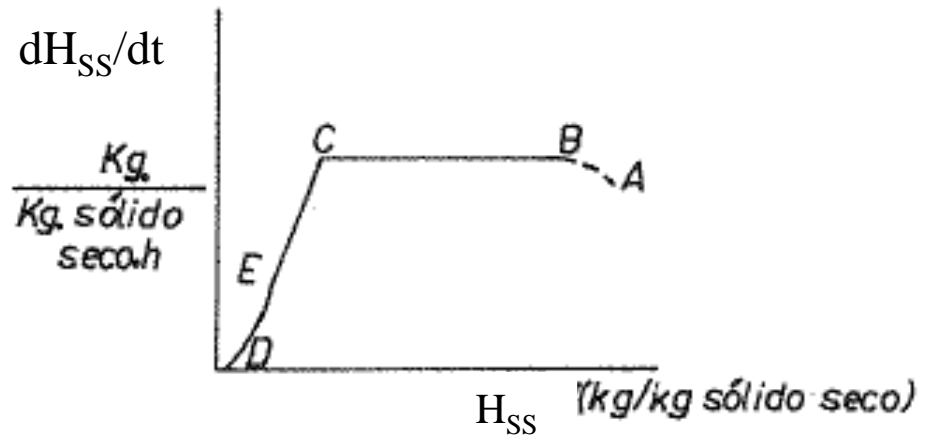
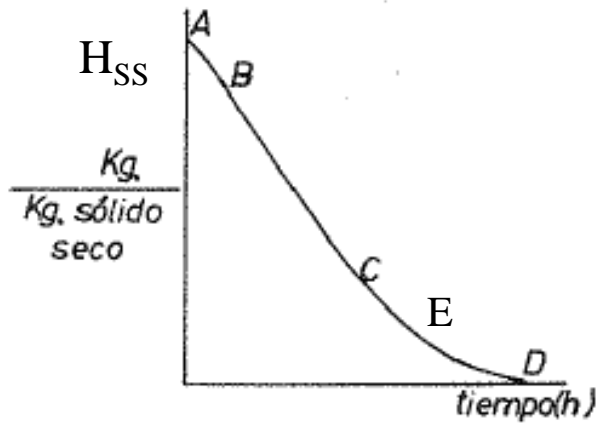
$$V = \frac{m}{S} \cdot \frac{dH}{dt}$$

$$\text{Unidades : } \frac{\text{Kg. liquido evaporado}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

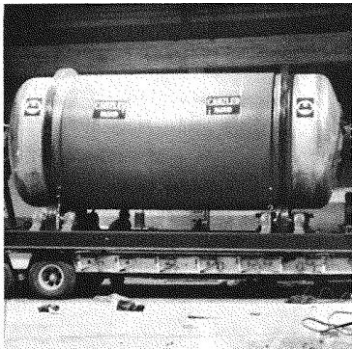


# SECADO : TEORÍA GENERAL

Secado de un sólido húmedo en aire caliente a temperatura y velocidad constante

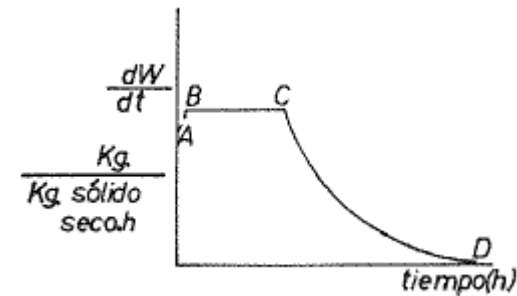
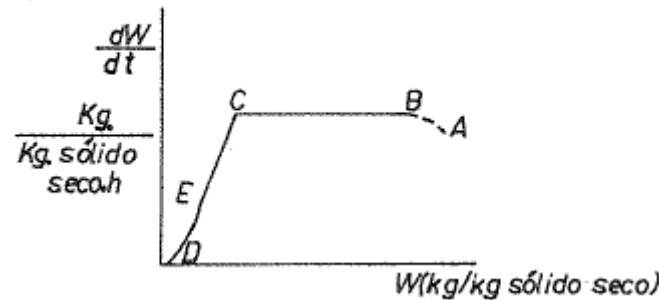
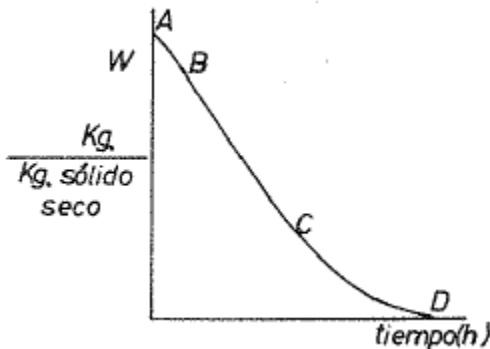


# SECADO

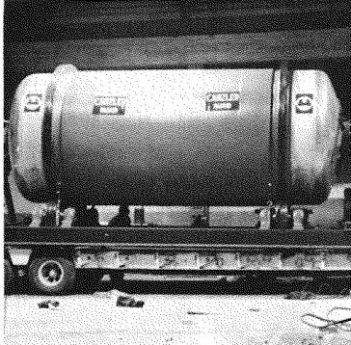


## TEORIA GENERAL DEL SECADO

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

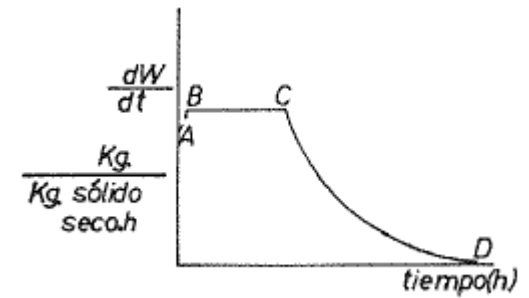
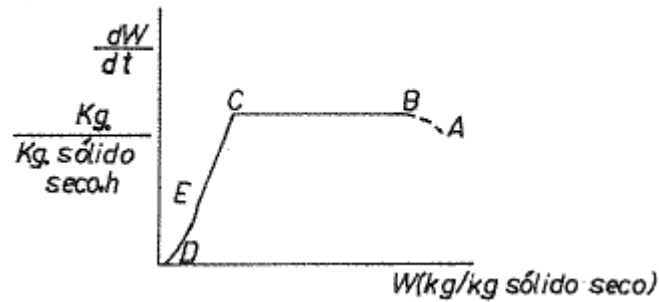
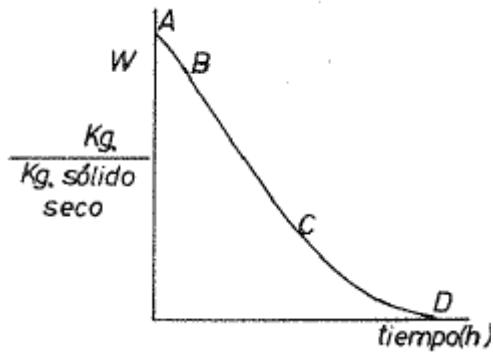


En el caso del secado por convección, el coeficiente de transferencia de calor es, relativamente, importante y no suele variar durante el desarrollo del secado por lo que la limitación de velocidad de secado está dada principalmente por el coeficiente de transferencia de materia

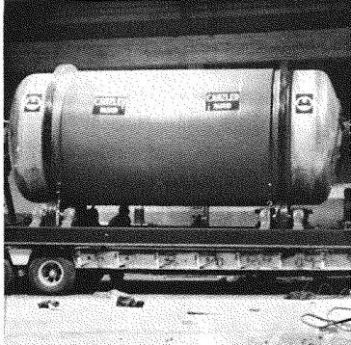


# SECADO

## TEORIA GENERAL DEL SECADO

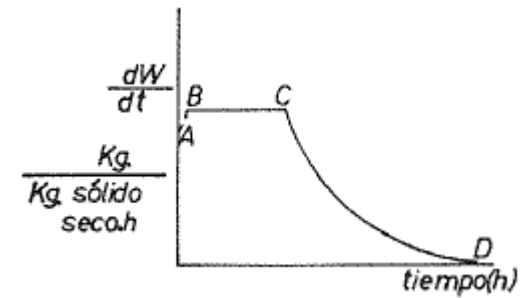
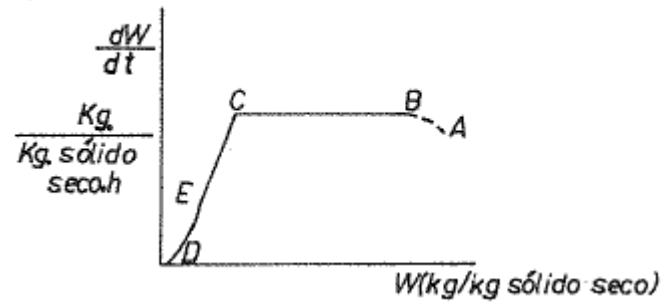
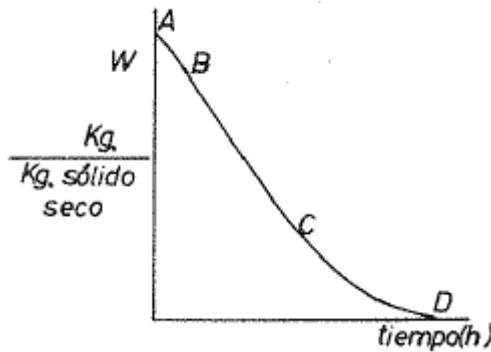


Este hecho pone de relieve la existencia de dos o más etapas de secado que se denominan período o etapa de velocidad constante y período o etapa de velocidad decreciente la segunda y, en su caso, tercera y cuarta



# SECADO

## TEORIA GENERAL DEL SECADO

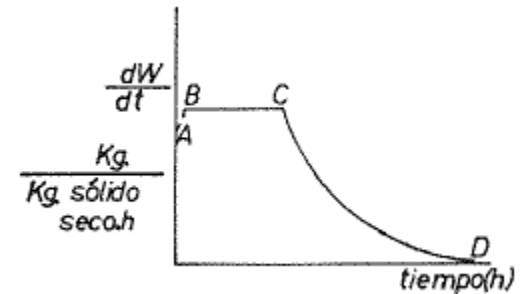


En el período de velocidad decreciente, la limitación viene fijada por el coeficiente de transferencia de materia que depende de las propiedades del material a secar y cuyo valor no es predecible. En la mayor parte de las ocasiones, el período de velocidad decreciente supone una parte muy grande del tiempo total de secado.

# SECADO

## Período de estabilización

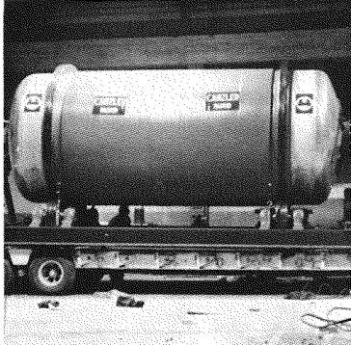
El período AB es el de estabilización durante el que las condiciones de la superficie del sólido se equilibran con las del aire de secado. Esta fase constituye una parte despreciable del tiempo total de secado



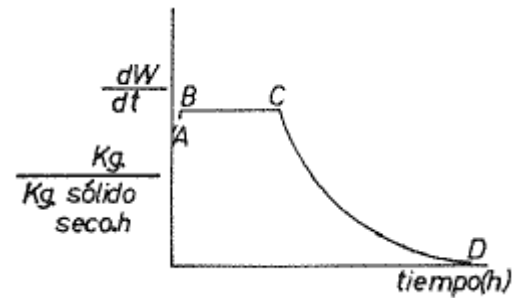
## Período de velocidad constante

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.



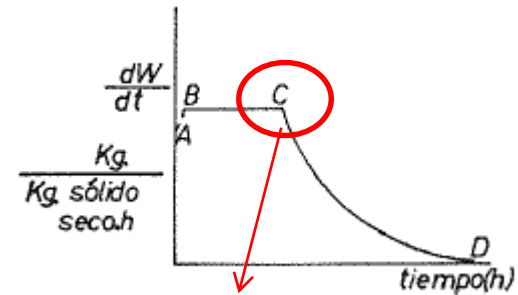
# SECADO



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.

En el secado por conducción, la velocidad de secado disminuye a medida que el material se seca debido a que disminuye la transferencia de calor de la pared al sólido que se está secando

# SECADO



$W_c = \text{Humedad crítica}$

Al final del secado, este mecanismo deja de ser limitante y el secado empieza a ser controlado por la velocidad de eliminación de agua desde el material. Esto trae, como consecuencia, un aumento de la temperatura del sólido.

La humedad del producto en el momento de cambio de velocidad constante a decreciente se conoce como humedad crítica

Esta humedad no es una constante física del material sino que depende de la velocidad de secado en el período inicial, del tipo de secador y de la transferencia de material

# SECADO

En el caso de transmisión de calor, exclusivamente, por convección, se verifica

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

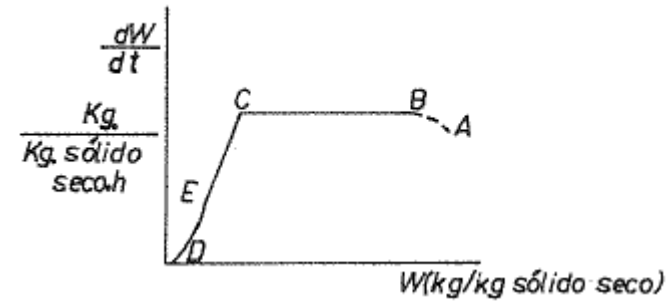
$\frac{dW}{dt}$  : velocidad de secado.

$L$  : calor latente de evaporación a la temperatura de la superficie.

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

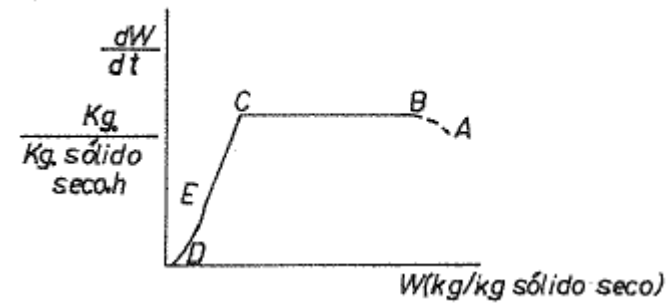
Es decir

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





# 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  $Kcal/h. m^2. C$ .

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

$T_a$ : temperatura del aire ( $^{\circ} C$ ).

$T_s$ : temperatura de la superficie de desecación ( $^{\circ} C$ ).

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. $^{\circ} C$ )

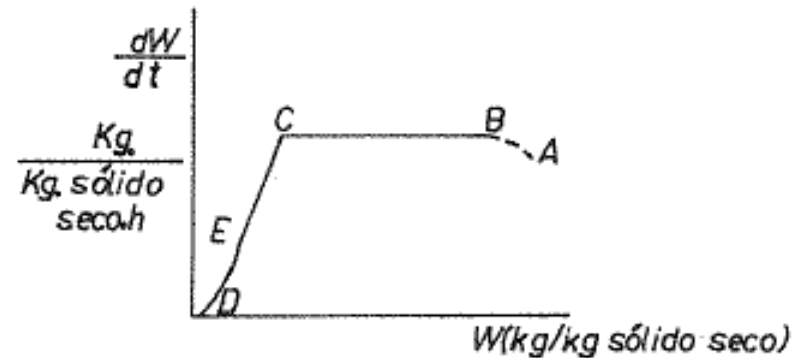
# SECADO

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

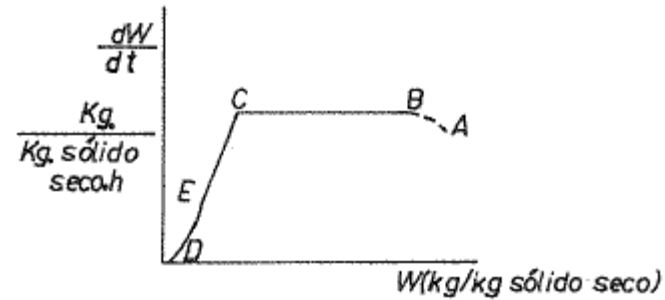
$$h_c = \frac{0,01 \cdot G^{0,8}}{D_c^{0,2}}$$

$D_c$ : dimensión característica del sistema (pies).

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

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

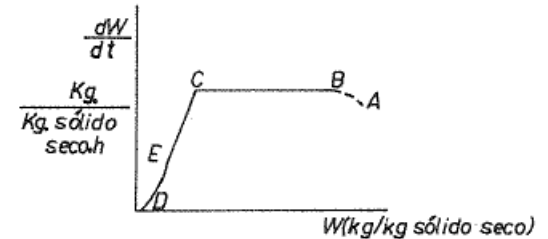
# SECADO



## 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.

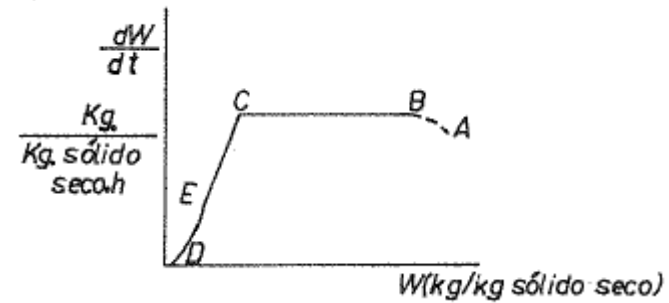
$W_e$ : contenido de humedad de equilibrio del producto a la temperatura y humedad del aire.

$d$ : 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

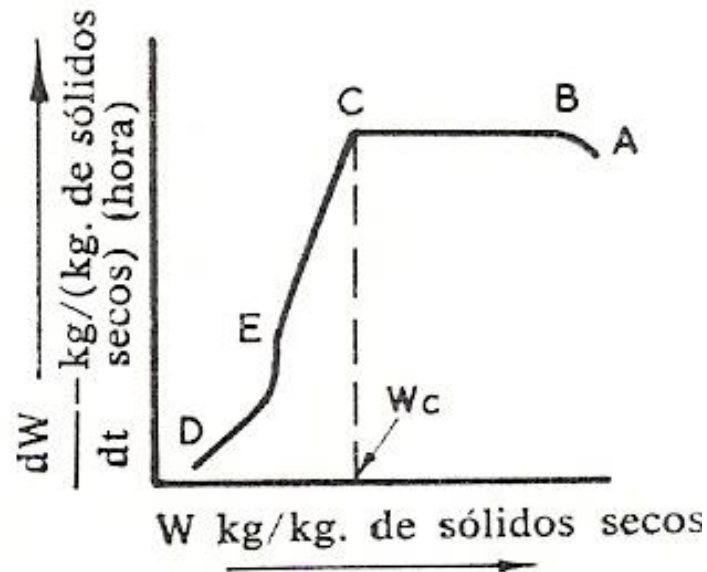
$$\frac{D \cdot t}{d^2} > 0,1$$

# SECADO

## MECANISMO DE SECADO

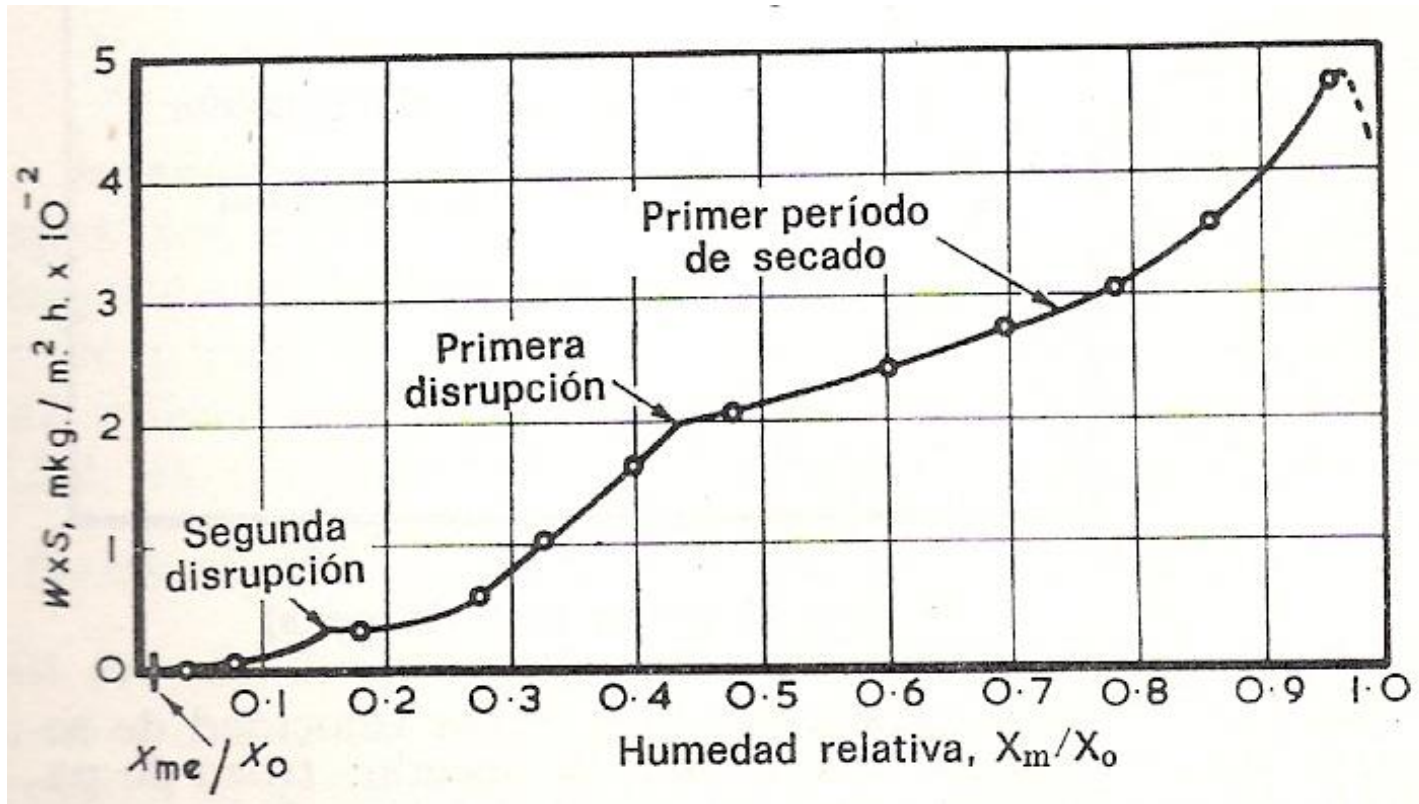
$$V = \frac{m}{S} \cdot \frac{dW}{dt}$$

Kg. liquido evaporado  
-----  
m<sup>2</sup> . h

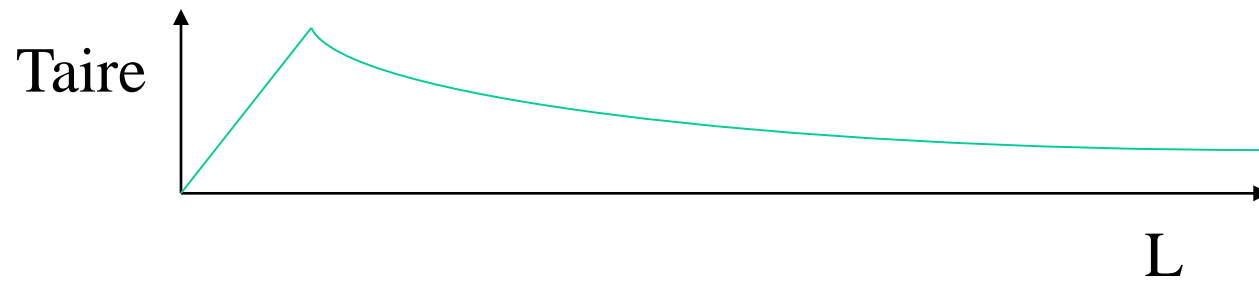
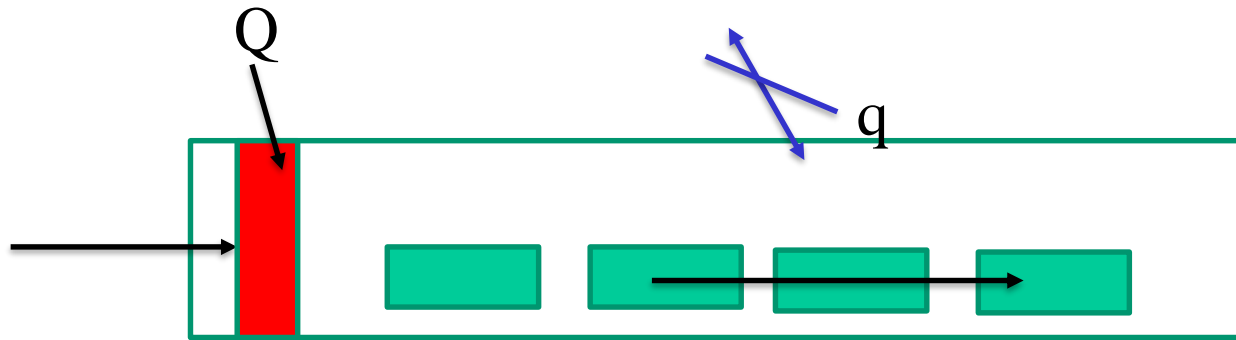


# SECADO

CURVA DE SECADO DE REBANADAS DE PAPAS CON AIRE A 60 °C

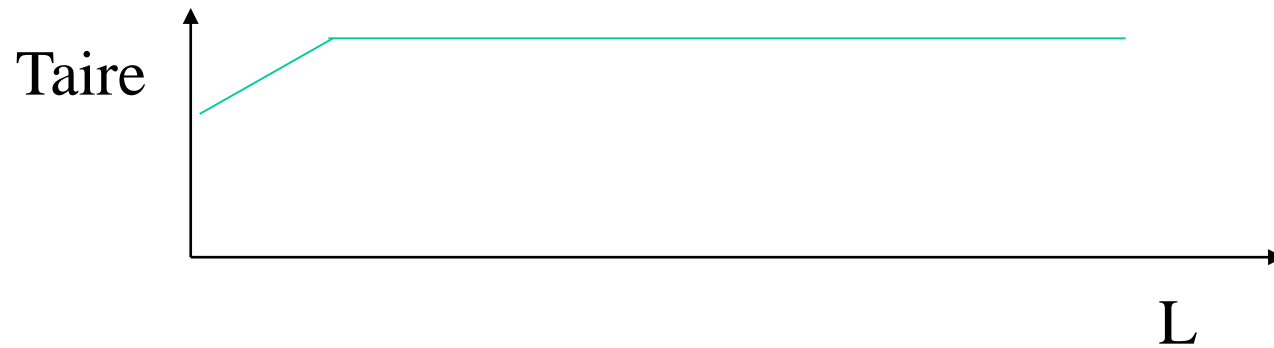
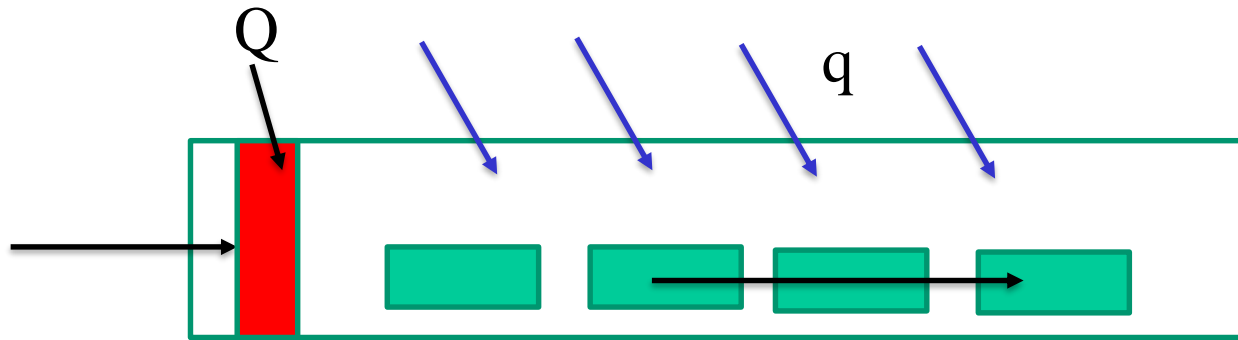


# Secado Adiabático



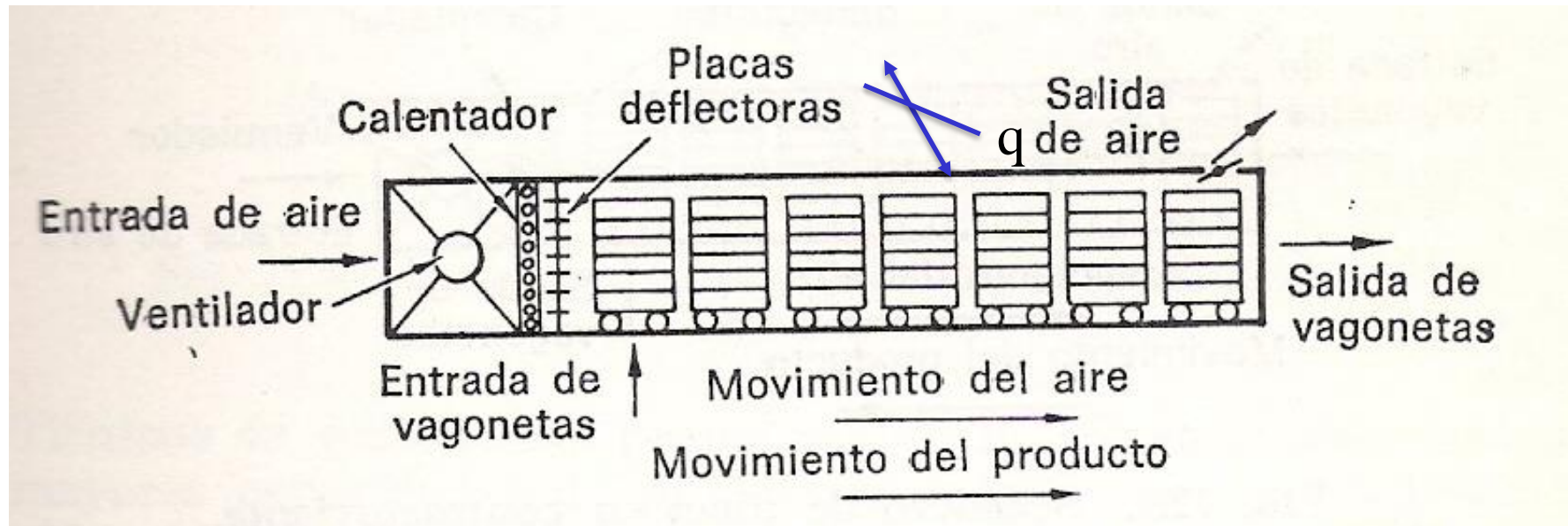


# Secado isotérmico



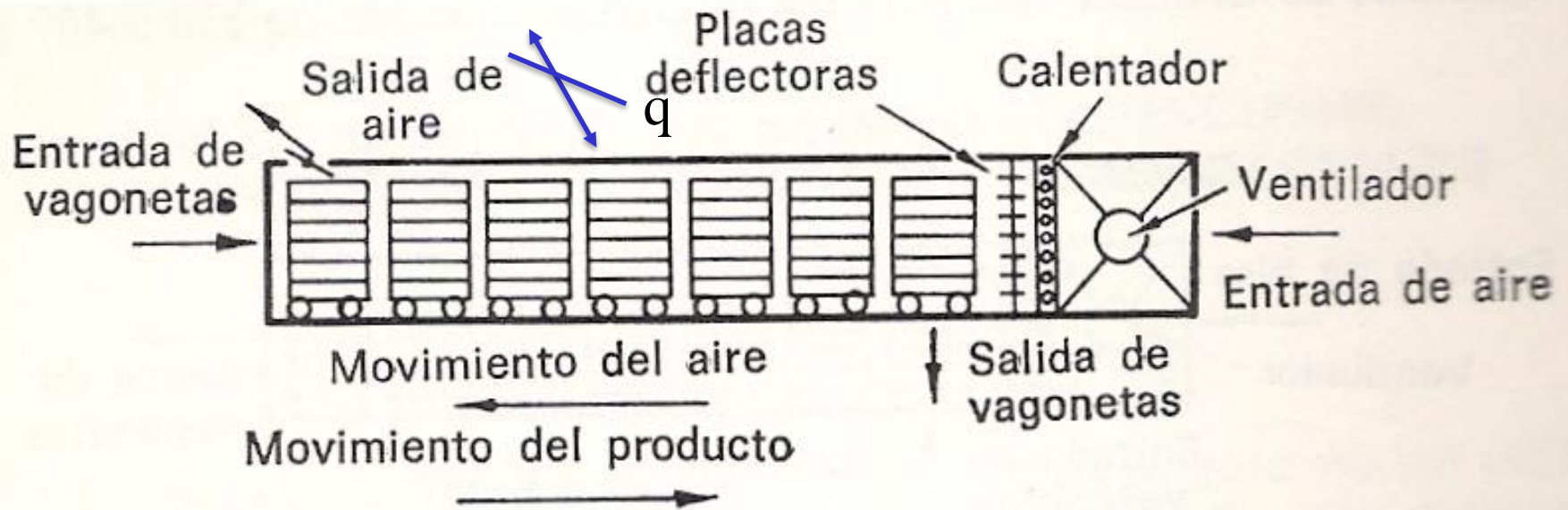
# SECADO

## SECADERO DE TUNEL EN PARALELO



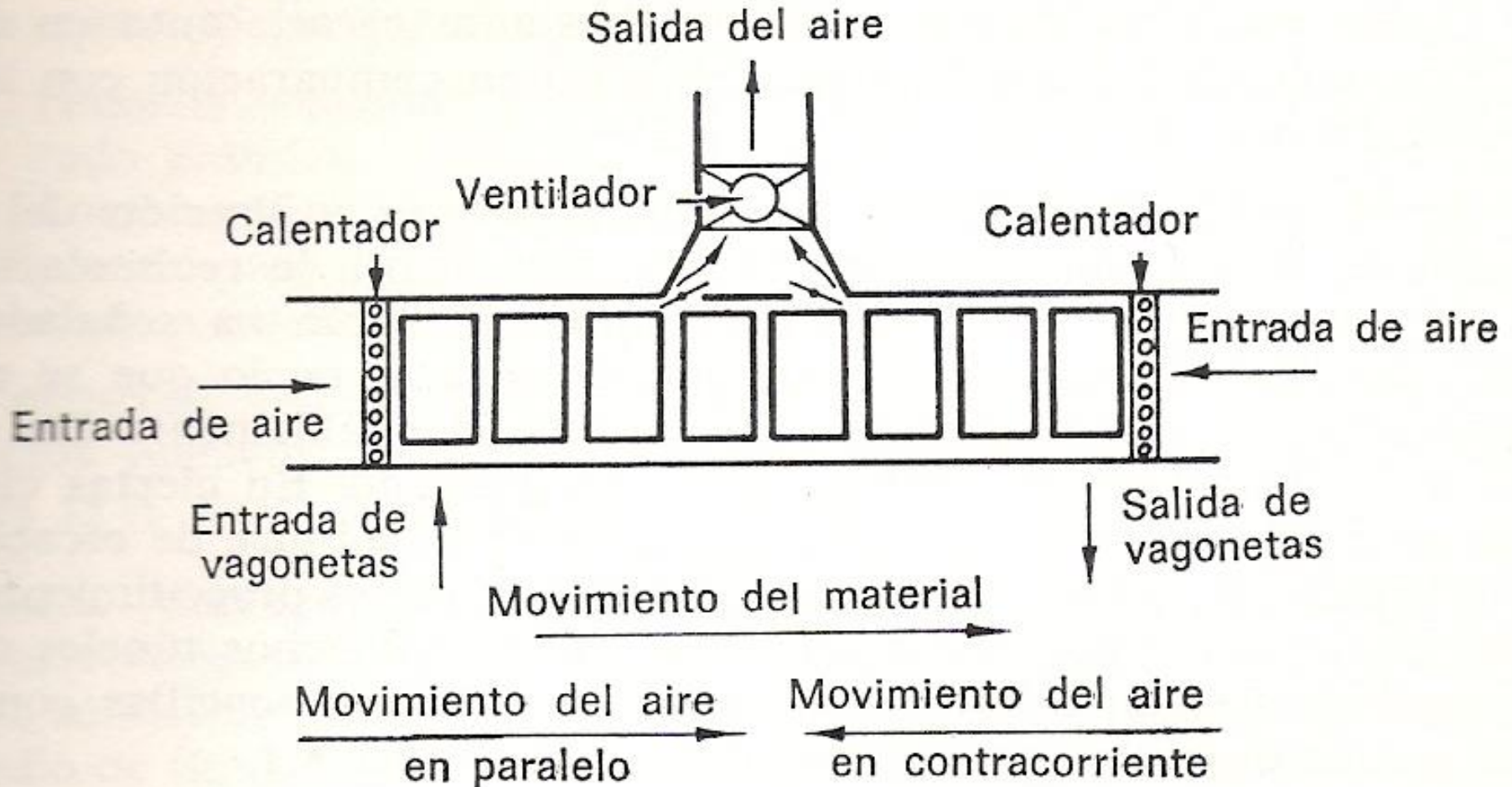
# SECADO

## SECADERO DE TUNEL EN CONTRACORRIENTE



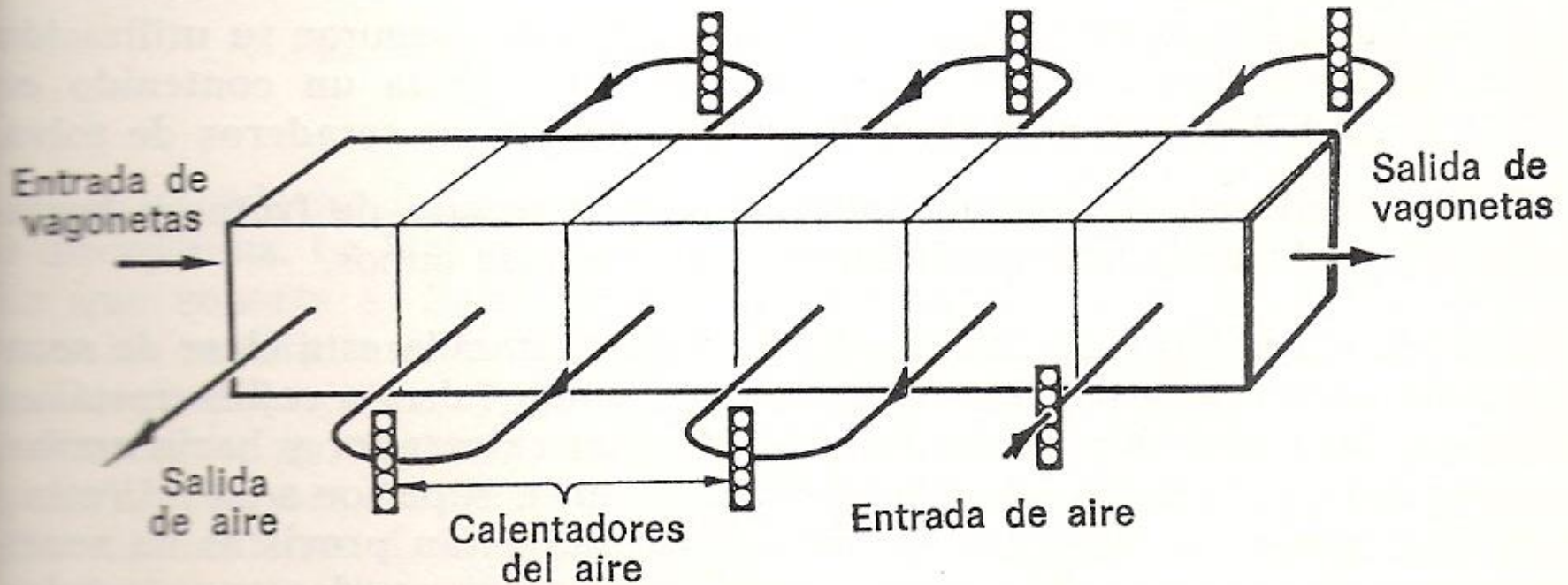
# SECADO

## SECADERO DE TUNEL CON DESCARGA CENTRAL



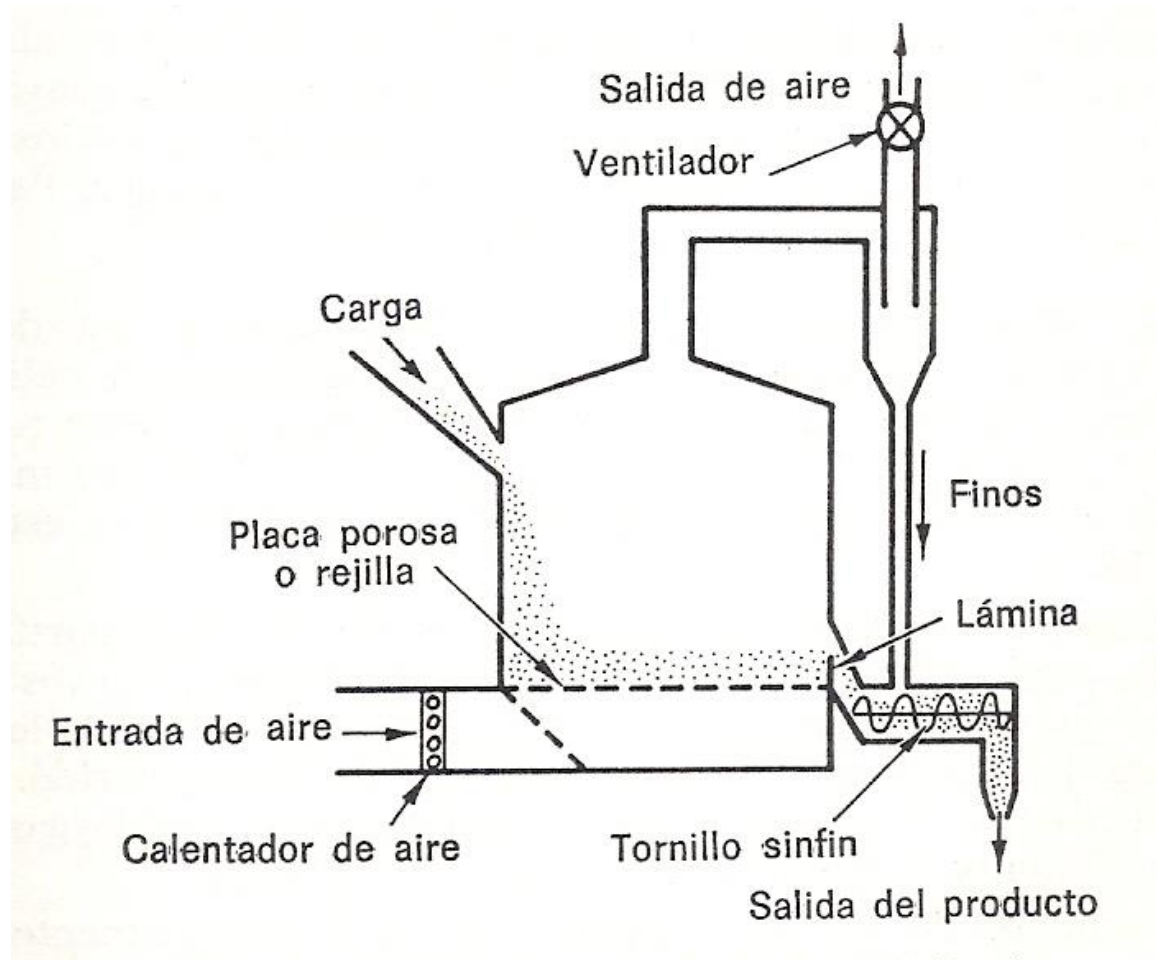
# SECADO

## SECADERO DE TUNEL DE FLUJO CRUZADO



# SECADO

## SECADERO CONTINUO DE LECHO FLUIDIZADO





# SECADO

Los caudales para secado y enfriamiento los proporcionan ventiladores centrífugos de doble oído. El aire caliente es generado por quemadores de gas o gasóleo instalados en la impulsión de aire del ventilador.

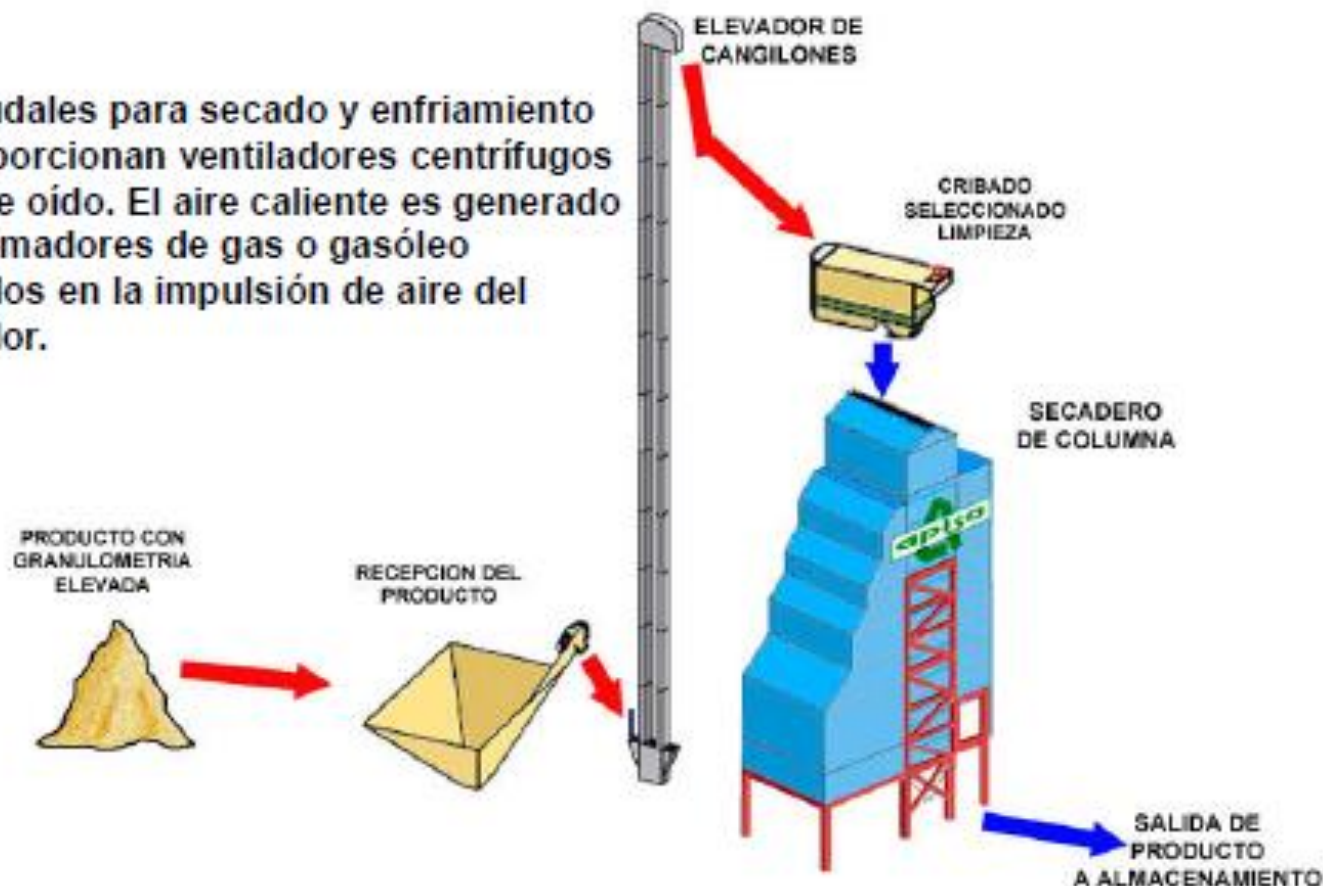


DIAGRAMA SECADERO DE COLUMNA

# SECADO



SECADERO TERMICO ROTATIVO



# SECADO



SECADERO TERMICO ROTATIVO

# SECADO

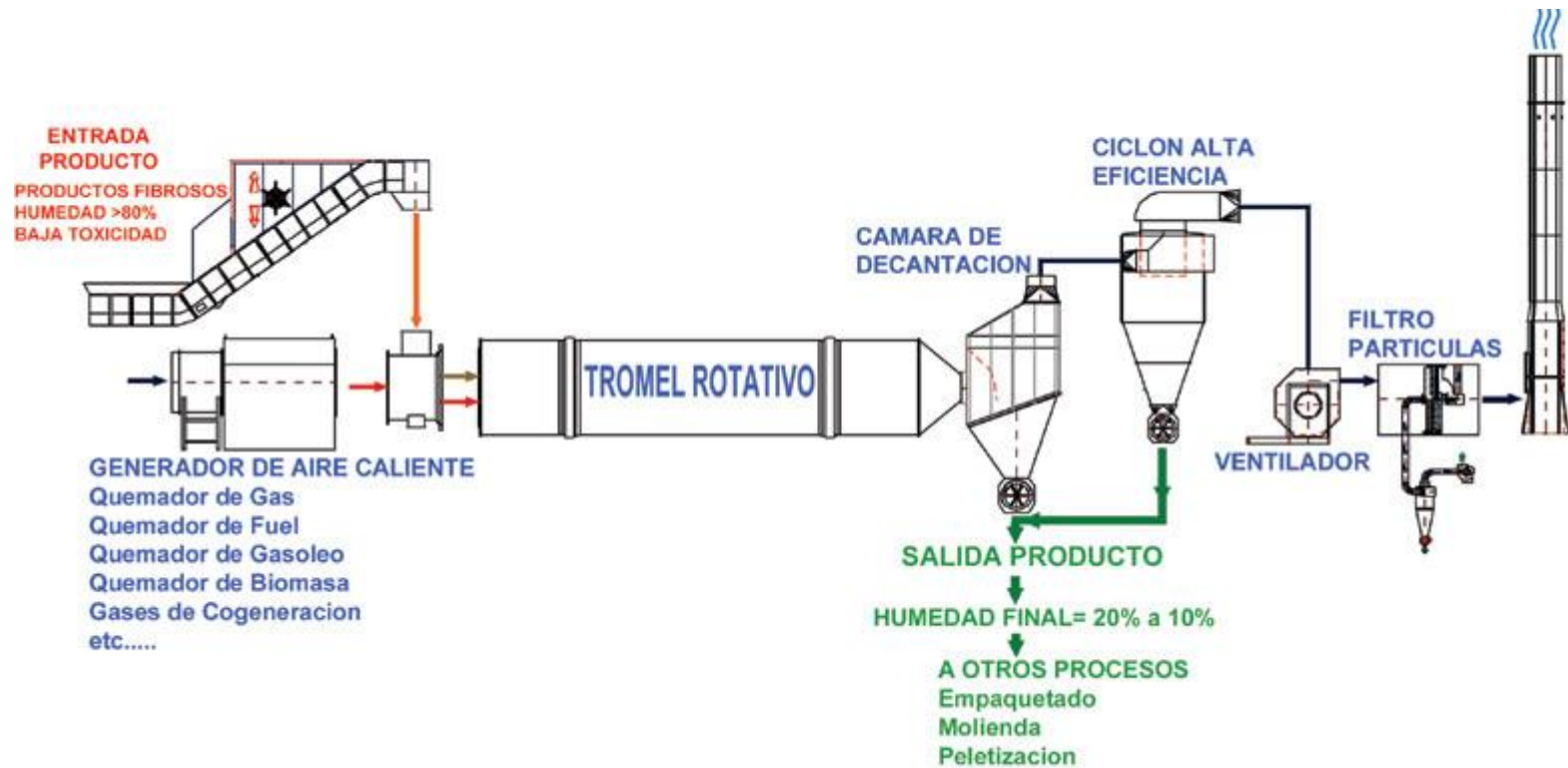


DIAGRAMA SECADERO TERMICO ROTATIVO DIRECTO

# SECADO

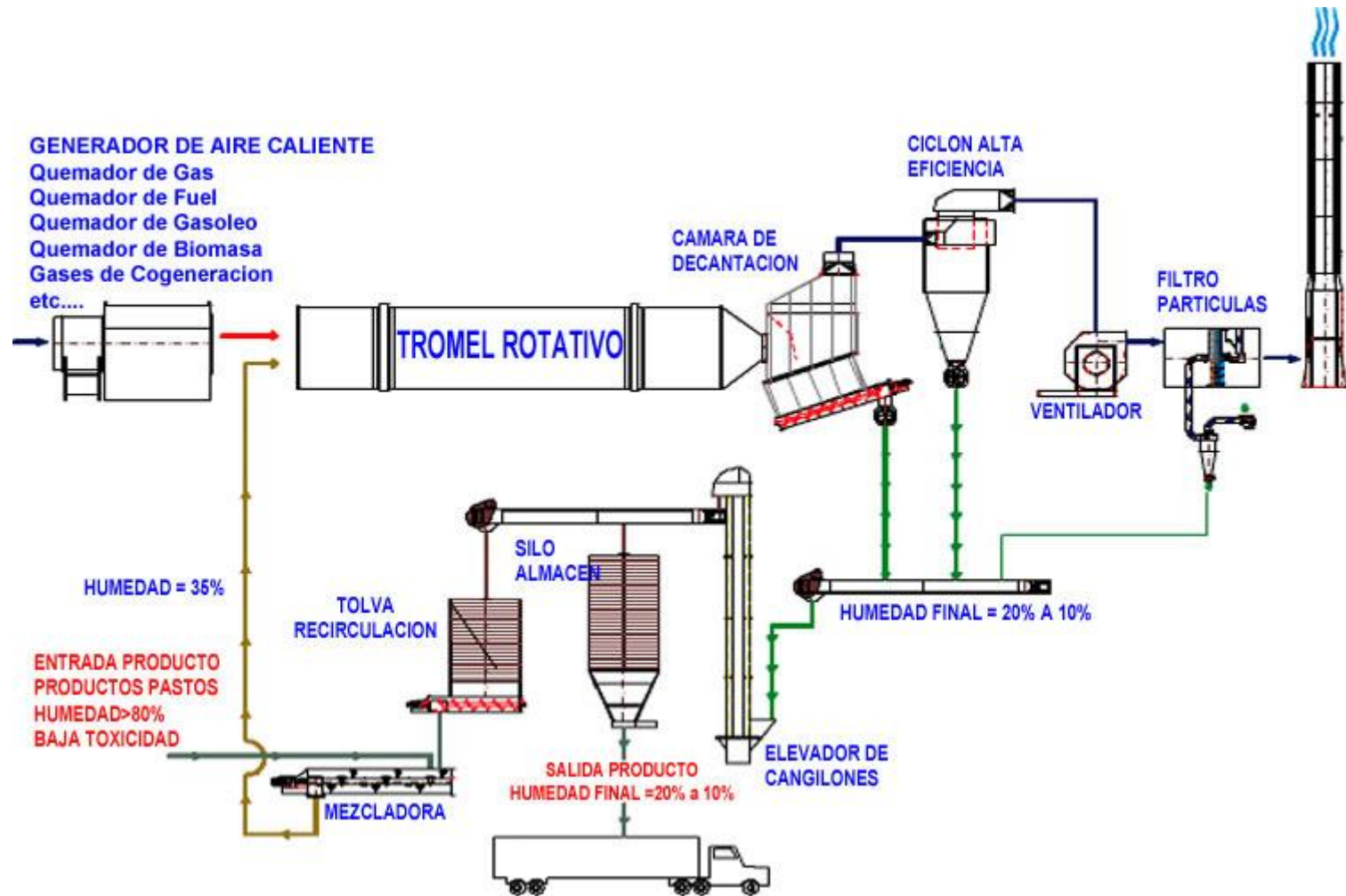
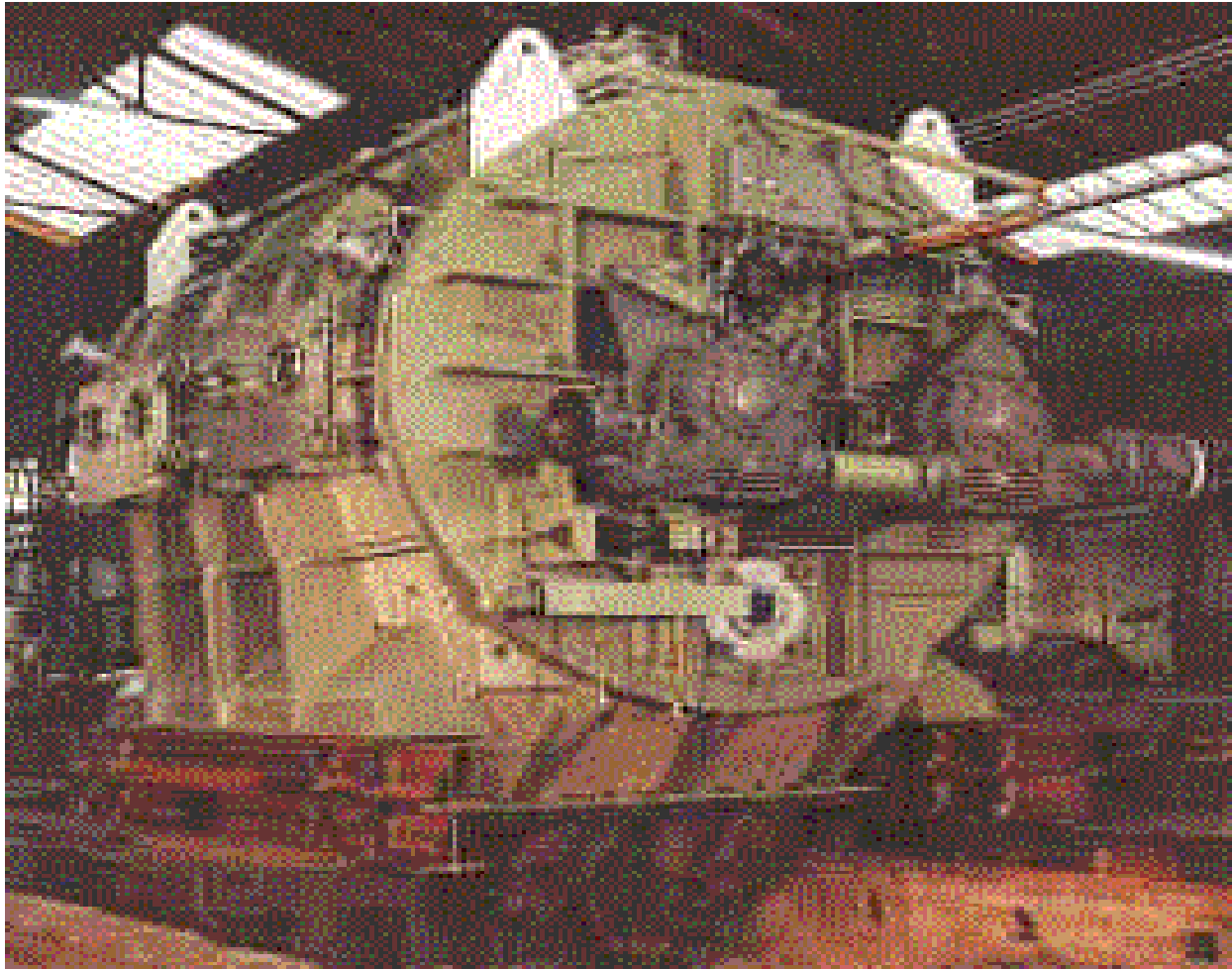


DIAGRAMA SECADERO TERMICO ROTATIVO DIRECTO CON RECIRCULACION



# 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



# SECADO



SECADERO CONTINUO DE TUNEL



**Muchas gracias por su atención**