

300618

3
2eg.



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA U.N.A.M.

“Diseño y Construcción de un Secador tipo Túnel para el Laboratorio de Química de la Universidad la Salle

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:

Ingeniero Químico

P R E S E N T A:

FERNANDO ALEJANDRO CAMILLI DESENTIS

Director de Tesis: Lic. M. en C. Antonio Valiente Borderas

México D.F.

1968

FAJA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

INTRODUCCION

CAPITULO I GENERALIDADES SOBRE EL SECADO

- a) Principios Básicos y Terminología
- b) Consideraciones Teóricas: Mecanismos de Transferencia
- c) Clasificación de Secadores
- d) Selección de Secadores
- e) Secadores de Túnel

CAPITULO II DISEÑO DEL SECADOR DE TUNEL

- a) Fundamentos Teóricos
- b) Cálculo del Secador

CAPITULO III CONSTRUCCION Y OPERACION

- Sistema de Circulación de Aire
- Sistema de Suministro de Calor
- Sistema de Transporte de Material
- Sistema de Instrumentación
- Costo del Equipo

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

I N T R O D U C C I O N

El secado es una de las operaciones unitarias de la Ingeniería Química con más amplia aplicación dentro de la Industria. La mayoría de los procesos industriales, particularmente en las áreas química, metalúrgica y alimentaria, tienen etapas en las cuales de alguna manera se lleva a cabo el secado de materiales, inclusive, se ha estimado que aproximadamente el 2% del total de las inversiones anuales hechas por las industrias químicas en equipo nuevo se destina a la instalación de equipo de secado.

La operación de secado es aquella en la que un líquido volátil es separado de un material sólido mediante la evaporación del primero. La energía requerida para llevar a cabo la evaporación del líquido se provee usualmente en forma de calor (secado térmico), ya sea por convección, proveniente de gas caliente que se pone en contacto con el material, por conducción, proveniente de una superficie caliente en contacto con el material y por radiación, proveniente de un gas o superficies calientes que se encuentran cercanos al material.

También puede suministrarse la energía requerida para la evaporación del líquido por medio de trabajo mecánico, radiofrecuencia, micro ondas, reacciones químicas exotérmicas y otros métodos que son relativamente poco utilizados. La justificación de incluir el secado dentro de algún proceso industrial puede tener muchas razones, como por ejemplo: la conveniencia del consumidor, la reducción en el costo del transporte, el asegurar la estabilidad del material, la remoción de líquidos tóxicos o perjudiciales, la recuperación de solventes y muy comúnmente la optimización de operaciones posteriores dentro del proceso.

Una apreciación más exacta sobre la aplicación y la importancia del secado puede ser obtenida haciendo referencia a las industrias más importantes en las que las operaciones de secado son etapas esenciales en la manufactura del producto final, como es el caso de las industrias de:

Alimentos y Productos Agrícolas

Pigmentos y Colorantes

Productos Farmacéuticos

Químicos Finos

Papel, Celulosa y Derivados

Minerales y Químicos Pesados

Textil

Cerámica

Etc.

El equipo utilizado para realizar la operación de secado es denominado secador y existen una gran variedad de diseños de secadores, uno de los cuales y quizá el más importante debido a su eficiencia y a la versatilidad de su aplicación en las industrias es el conocido como secador de túnel, sobre el cual se desarrolla el presente trabajo.

C A P Í T U L O

I

GENERALIDADES SOBRE EL SECADO

Debido a que el secado es una operación en la que un líquido se separa de un sólido por evaporación, cualquier proceso de secado se caracteriza de manera general por el mecanismo de transferencia de masa que involucra la remoción de vapor en la superficie del material y el movimiento de la humedad interna hacia la superficie, así mismo, el mecanismo de transferencia de calor tiene igual importancia dentro del proceso de secado, por el hecho de que la separación del líquido se realiza mediante su conversión en vapor. La estructura del material y los mecanismos de flujo del líquido, interno y del vapor usualmente son las variables que controlan la velocidad de secado del material.

Por la razón de que todas las operaciones de secado precisan del manejo de sólidos, la capacidad del equipo para satisfacer este requerimiento es de suma importancia, de aquí se explica la diversidad de secadores que se utilizan en las diferentes industrias.

Es recomendable que el secado sea precedido por una operación de separación mecánica con el fin de minimizar la cantidad de líquido que debe ser evaporada, ya que la separación líquido-sólido sin evaporación, como por ejemplo: la cristalización, la filtración, la centrifugación o la sedimentación, suele ser más económica que el secado.

Normalmente, las características del producto final, las propiedades físicas y químicas de los materiales que se procesan (sólidos y líquidos) y las opciones de proceso determinan el método de secado y el equipo a utilizarse. Por otro lado los cos-

tos son fijados generalmente por la operación, el equipo, el material de construcción, el combustible y el tamaño de la planta.

a) PRINCIPIOS BASICOS Y TERMINOLOGIA

En cualquier sólido húmedo, la humedad contenida dentro de él ejerce forzosamente una presión de vapor, la cual depende de la temperatura, de la naturaleza del sólido y de las características de la humedad, por lo tanto si se hace pasar una corriente de aire por encima de un sólido húmedo, éste o bien perderá humedad por evaporación o ganará humedad del gas hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a la presión parcial de la corriente de aire. En ese momento el sólido y el gas estarán en equilibrio, quedando el sólido con su contenido de humedad en el equilibrio en las condiciones predominantes.

Si nos referimos a sólidos que contienen líquidos insolubles, una mayor exposición del sólido húmedo a la misma corriente de aire, una vez alcanzado el equilibrio, no provocaría pérdidas adicionales de humedad, sin embargo sí se podría reducir más la humedad con una corriente de aire de menor contenido de humedad.

La humedad en el equilibrio para un sólido dado depende del tamaño de partícula o de la superficie específica si la humedad está físicamente absorbida antes de que cualquier otra forma. Los sólidos tienen curvas de humedad en el equilibrio distintas, incluso los mismos sólidos muestran curvas diferentes cuando están húmedos con líquidos diferentes al agua.

Muchos sólidos tienen características de humedad en el equilibrio distintas dependiendo si el equilibrio se alcanza por condensación (adsorción) o por evaporación (desorción de la humedad), como se puede ver en la figura (1).

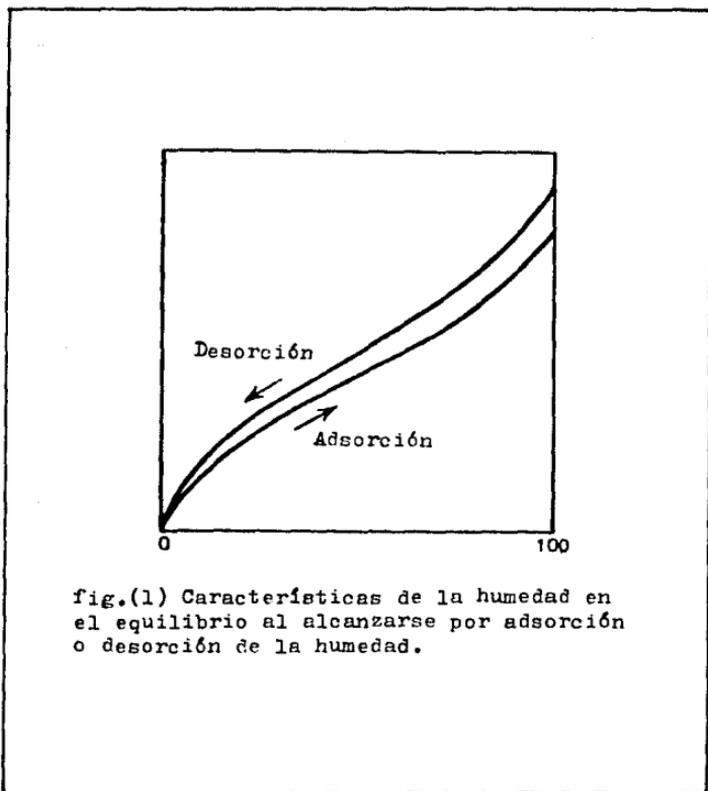


fig.(1) Características de la humedad en el equilibrio al alcanzarse por adsorción o desorción de la humedad.

En el secado, el equilibrio de desorción es de gran importancia ya que muestra el mayor contenido de humedad en el equilibrio para una presión parcial dada de vapor, pero, por otro lado, el equilibrio de adsorción, es decir, la humedad recogida por el sólido al exponerse a aire húmedo, sirve para determinar el contenido de humedad que conviene que tenga el sólido a la salida del secador y así evitar que gane humedad al contacto con el aire o la atmósfera a la cual se expondrá durante su transporte o almacenamiento.

Si nos referimos a materiales húmedos que contienen sólidos solubles en el líquido de que se trate, éstos generalmente tienen humedades en el equilibrio muy bajas cuando se exponen a un gas con presión parcial de vapor menor a la de la solución saturada del sólido. Si el sólido se expone a aire con contenido de vapor mayor, el sólido adsorbe humedad, disolviéndose. (Este efecto se llama deliquesencia).

Como una referencia conveniente, a continuación se definen y explican los conceptos y la terminología que se utiliza normalmente para describir las características, condiciones y fenómenos que ocurren durante las operaciones de secado.

EL CONTENIDO DE HUMEDAD de un sólido, es la cantidad de humedad por unidad de peso sólido seco (contenido de humedad en base de peso seco, por ejemplo: Masa de humedad/Masa de Sólido - Seco) o húmedo (contenido de humedad en base a peso húmedo, por ejemplo: Masa de humedad/Masa de sólido seco + Masa de humedad).

EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO es la humedad hasta la cual se puede secar un material en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire.

DISTRIBUCION INICIAL DE HUMEDAD es la distribución de la humedad contenida por un sólido al iniciarse un proceso de secado.

HUMEDAD APRISIONADA es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura. La retención del líquido puede ser debida a su adsorción sobre superficies del sólido, a la formación de soluciones con el material y a su retención en capilares.

HUMEDAD NO APRISIONADA se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

HUMEDAD LIBRE es la humedad contenida por una sustancia que está en exceso de la humedad en el equilibrio.

CONTENIDO CRITICO DE HUMEDAD es el contenido de humedad promedio cuando concluye el período de velocidad de secado constante.

MATERIAL HIGROSCOPICO es aquél que puede contener humedad ocluida dentro de él.

ESTADO FUNICULAR es la condición en la desecación de un sólido poroso en la que la succión capilar hace que se absorba aire dentro de los poros.

ESTADO PENDULAR es el estado de un líquido dentro de un sólido cuando ya no existe una película continua de líquido entorno a partículas discretas y por lo tanto no se puede producir un flujo por capilaridad.

FLUJO CAPILAR es el flujo de líquido por los intersticios y sobre la superficie de un sólido. Esto es provocado por la -- atracción molecular entre líquido y sólido.

PUNTO DE SATURACION DE FIBRA es el contenido de humedad - de materiales celulares a la cual las paredes celulares están -- completamente saturadas mientras que el interior de éstas está - seco.

DIFUSION INTERNA es el movimiento del líquido o el vapor -- a través de un sólido provocado por un gradiente de concentración.

LA PSICROMETRIA EN RELACION AL SECADO

La cantidad de aire requerido para remover la humedad liberada por el sólido, así como la cantidad de aire que proporcionará el calor necesario a través del descenso de su temperatura durante el proceso de secado, tienen que ser determinadas por medio de la capacidad del aire para recoger la humedad a una temperatura dada, en relación con su contenido inicial de humedad. Para lo anterior es sumamente útil y práctico el uso de una carta psicrométrica.

El manejo de una carta psicrométrica no es complicado, pero sí es necesario conocer las expresiones y conceptos sobre los cuales se basa la construcción de dicha carta. A continuación se describen dichas expresiones y conceptos haciendo referencia a la figura (2) en la cual se grafican las propiedades de mezclas de aire y vapor de agua.

LINEA DE SATURACION representa el peso máximo de vapor de agua que puede ser llevado por una unidad de peso de aire seco. Para cualquier temperatura del aire en las abscisas, la humedad a la saturación se encuentra leyendo hacia arriba hasta la curva -

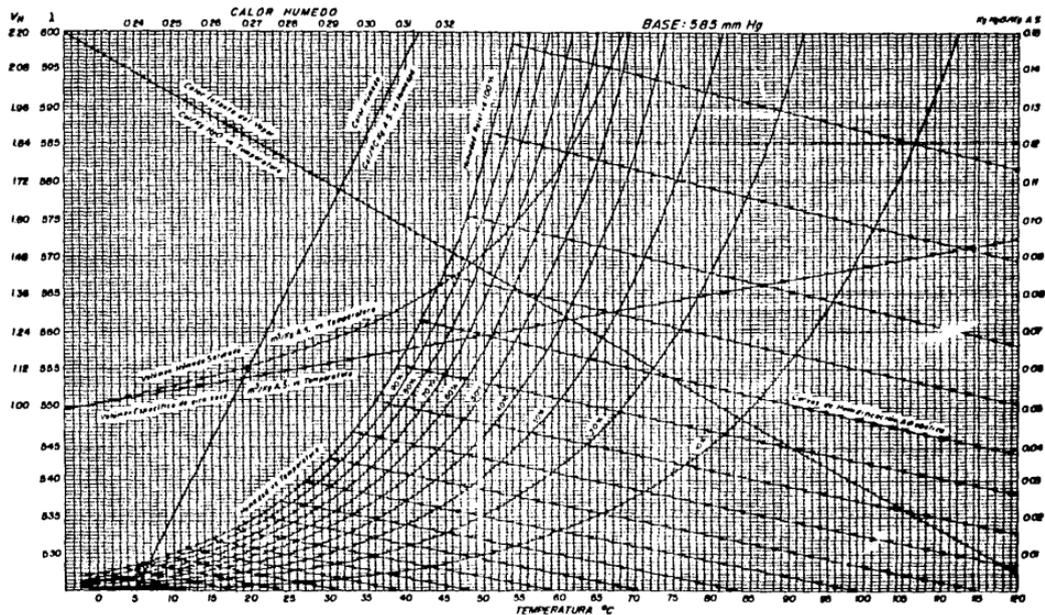


FIG. (2). CARTA PSICROMETRICA. Cortesía del Lab. de Ingeniería Química de la U.N.A.M.

de temperatura de saturación (línea de saturación) y entonces ho rizontalmente hasta las ordenadas, por ejemplo Masa de humedad/Masa de aire seco.

A la humedad de saturación, las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco son idénticas y la presión parcial del vapor - en el aire es igual a la presión de vapor de agua a la misma temperatura.

$$Y_{sat} = \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}} \frac{18}{28.9}$$

Y_{sat} = Humedad de saturación (Masa de humedad/Masa de aire seco)

P = Presión Total del Sistema

P_{vs} = Presión de Vapor de Agua a la Temperatura del Gas

18 = Peso Molecular del Agua

28.9 = Peso Molecular del Aire

Por lo tanto, en cualquier condición menor a la saturación la humedad se expresa de manera similar:

$$Y_g = \frac{P}{P - p} \frac{18}{28.9}$$

p = Presión Parcial del Vapor en el aire

CURVAS DE PORCENTAJE DE HUMEDAD RELATIVA

Indican el porcentaje de saturación y están relacionadas con la presión de vapor de la siguiente manera:

$$\%Y_r = \frac{100 P}{P_{vs}}$$

VOLUMEN HUMEDO es el volumen específico de aire seco más el volúmen del vapor que contiene. En la carta son las líneas - designadas como volúmen de aire húmedo por masa de aire seco.

ENTALPIA los valores de entalpia se expresan como energía (KJ) por masa de aire seco. Las condiciones de referencia utilizadas son aire gaseoso y agua líquida saturada a cero °C.

CURVAS DE SATURACION ADIABATICA para mezclas de aire con vapor de agua las líneas diagonales de temperatura de bulbo húmedo son aproximadamente las mismas que a las de saturación adiabática.

$$(Y_{sg}-Y_g) = \frac{c_H}{\lambda} (T_g-T_{sg})$$

Y_{sg} = Humedad de saturación adiabática a las condiciones Y_g y T_g del Gas.

T_{sg} = Temperatura de saturación adiabática a las condiciones Y_g y T_g

c_H = Calor húmedo a la humedad Y_g

λ = Calor latente de evaporación a T_{sg}

La temperatura de bulbo húmedo se establece al lograrse el equilibrio dinámico entre la transmisión de calor y la transferencia de masa cuando el líquido se evapora de una masa pequeña hacia una muy grande de modo que la última mantiene constantes su temperatura y humedad.

Esto se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$h_c (T_g - T_{wb}) = k_y \lambda (Y_{sw} - Y_g)$$

h_c = Coeficiente de Transferencia de calor por convección

T_g = Temperatura del aire

T_{wb} = Temperatura de Bulbo Húmedo del Gas

k_y = Coeficiente de Transferencia de Masa

λ = Calor latente de evaporación a T_{wb}

Y_{sw} = Humedad saturada a T_{wb}

Y_g = Humedad del Aire Circundante

Para mezclas aire - vapor de agua

$$h_c/k_y \approx c_H$$

Por lo tanto:

$$\frac{Y_{sw} - Y_g}{T_{wb} - T_g} = \frac{hc}{ky} = \text{Pendiente de las líneas de temperatura de bulbo húmedo}$$

$$\frac{Y_{sw} - Y_g}{T_{wb} - T_g} = \frac{C_H}{\lambda} = \text{Pendiente de las líneas de saturación adiabática}$$

CALOR HUMEDO

$$C_H = c_g + c_v Y_g$$

C_H = Calor Húmedo de Aire

c_g = Calor Específico del Aire Seco

c_v = Calor Específico del Vapor de Agua

Y_g = Humedad del Gas

b) CONSIDERACIONES TEORICAS: MECANISMOS DE TRANSFERENCIA

Durante cualquier secado térmico se llevan a cabo simultáneamente la transferencia de calor (para evaporar el líquido contenido en el material húmedo) y la transferencia de masa (para llevar la humedad interna a la superficie del material y posteriormente evaporarse).

El movimiento de la humedad interna dentro del sólido dependerá de la naturaleza física del sólido y del contenido de humedad; por otro lado, el movimiento del vapor de agua desde la superficie del material será función de las condiciones externas de humedad, temperatura y flujo del aire, así como del área de la superficie expuesta y de la presión del sistema.

CONDICIONES INTERNAS

Al transferirle calor a un material húmedo, desde la superficie que recibe directamente el calor hasta la superficie en la que se evapora el líquido, se genera un gradiente de temperaturas, lo cual hace que el líquido ascienda hasta la superficie,

pudiendo llevarse a cabo a través de los siguientes mecanismos: difusión, flujo capilar, gradientes de presión internos por encogimiento, flujo producido por gravedad y circulación debido a secuencias de vaporización y condensación.

Estos mecanismos suceden generalmente en combinaciones -- que predominan en las diferentes etapas durante el proceso de secado. La difusión, como mecanismo de desplazamiento de la humedad, puede ser en forma de vapor o de líquido. Si es en forma de vapor, se requiere la generación de un gradiente de presión de vapor, el que se dá como consecuencia de gradientes de temperatura dentro del sólido.

Si hablamos de difusión de líquido nos referimos exclusivamente al contenido de humedad de equilibrio por debajo del punto de saturación atmosférica y en sistemas con sólidos solubles en el líquido de que se trate. En el caso de cerámica, maderas de construcción, etc., donde ocurre un encogimiento considerable durante su secado, los gradientes de humedad que se generan pueden llevar un rompimiento del material debido a un sobre secado del material en ciertos puntos.

CONDICIONES EXTERNAS

El mecanismo de evaporación externo en la superficie del sólido y el efecto de las variables externas son de gran importancia en la investigación de las características de secado de materiales, en la selección del secador adecuado para un sólido determinado y en la optimización de las condiciones de operación.

Las variables externas esenciales son la temperatura, humedad, velocidad y dirección del flujo de aire, forma física del sólido, grado de agitación del sólido y método de soporte del mismo.

Con respecto a la transferencia de calor como ya se mencionó anteriormente, la energía necesaria para evaporar el líquido

do contenido en el sólido se provee normalmente en forma de calor. En general, en los secadores que funcionan por convección-forzada de un gas caliente los efectos de la transmisión de calor por conducción y radiación pueden ser considerables cuando las temperaturas en la superficie del material son mayores que la temperatura de bulbo húmedo del gas circulante.

La velocidad de la transferencia de calor en un secador, dependerá principalmente de la velocidad del gas caliente, de su temperatura y de la agitación del sólido.

En el caso de secadores indirectos, se debe buscar el máximo contacto entre las superficies calientes del secador y el sólido que se deba secar, además del mayor movimiento relativo posible entre las áreas de contacto. En los secadores directos una alta velocidad del gas caliente reducirá el film estacionario de gas que se forma sobre la superficie del sólido y por lo tanto aumentará el coeficiente de transferencia de calor.

La velocidad de secado aumenta directamente con la velocidad de transmisión de calor, por lo tanto el medio de calentamiento debe operar la máxima temperatura posible, la cual está restringida generalmente por la resistencia a las altas temperaturas que presentan el sólido y el material de construcción del secador.

El mecanismo de transferencia de calor, como ya se dijo anteriormente, puede ser por convección, por conducción y por radiación.

En el caso de transmisión de calor por convección, el flujo de calor está dado por la siguiente expresión:

$$q_c = h_c (T_g - T_s)$$

En donde:

- q_c = Flujo de Calor por Convección
 h_c = Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección
 T_g = Temperatura del Gas (Bulbo Seco)
 T_s = Temperatura de la Superficie Húmeda

En el caso de conducción la ecuación es la siguiente:

$$q_h = U_K (T_h - T_s)$$

en donde:

$$U_K = \frac{1}{(1/h_e)(A/A_u) + (Z_m/k_m)(A/A_u) + (Z_s/k_s)(A/A_m)}$$

- q_h = Flujo de calor por conducción
 T_h = Temperatura de la Fuente de Calor
 T_s = Temperatura de la Superficie Húmeda
 k_s, k_m = Conductividad Térmica del Material y del Plato
 A_u, A_m = Superficie que no se está secando y área de la sección transversal promedio del sólido a secar
 Z_m, Z_s = Espesor del material del plato y del sólido a secar
 A = Superficie que se está secando

y para el caso de radiación es:

$$q_r = h_r(T_r - T_s) = E (5.79 \times 10^{-8}) (T_r^4 - T_s^4)$$

en donde:

- q_r = Flujo de Calor por Radiación
 h_r = Coeficiente de Transferencia de Calor por Radiación
 E = Emisividad del material

Por otro lado, el conocimiento de los mecanismos de transferencia de masa del líquido y el vapor durante el proceso de secado es de gran importancia en la selección adecuada del tipo de

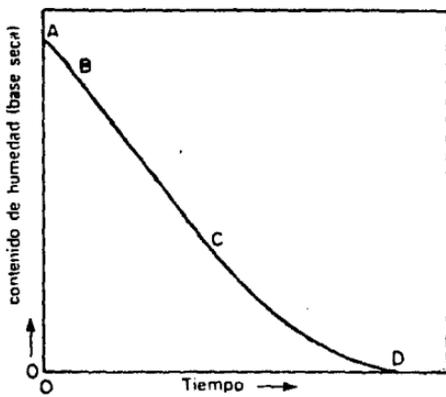
secador, en el dimensionamiento del equipo, en el control de calidad del producto a secar y en la determinación de tiempos de secado de lotes de un material específico.

Estos mecanismos de transferencia pueden ser identificados y estudiados satisfactoriamente a través de la determinación experimental de las características de secado de un sólido húmedo, lo que se realiza normalmente tomando datos de contenido de humedad de la muestra contra el tiempo de secado de la misma, bajo condiciones controladas. Estos datos se pueden graficar como se muestra en la figura (3) obteniéndose una curva en la que se observa que la velocidad de secado varía considerablemente durante el proceso, originando así los llamados períodos de secado.

Distintos materiales se comportan de diferente manera y un cambio en el método de manejo de un material o en cualquier variable de operación como por ejemplo, la velocidad de transmisión de calor, afectará rápidamente el mecanismo de transferencia de masa.

La figura (4) representa el caso de materiales que primero pierden su contenido de humedad por evaporación debido a una superficie saturada del sólido después por evaporación de una superficie cuya área va decreciendo y finalmente por evaporación en el interior del sólido. La variación del contenido de humedad en función del tiempo se puede apreciar más claramente en una gráfica dw/dt en función de la humedad o en una gráfica dw/dt en función del tiempo como se muestra en figura (5) y (6) respectivamente.

La mayoría de los materiales muestran tres etapas distintas en la curva de velocidad de secado, denominándose sección AB aquella en la que el material húmedo está calentándose; la sección BC representa el período de velocidad de secado constante y CD es el período de velocidad de secado decreciente.



fig(3) Contenido de humedad del sólido en función del tiempo de secado.

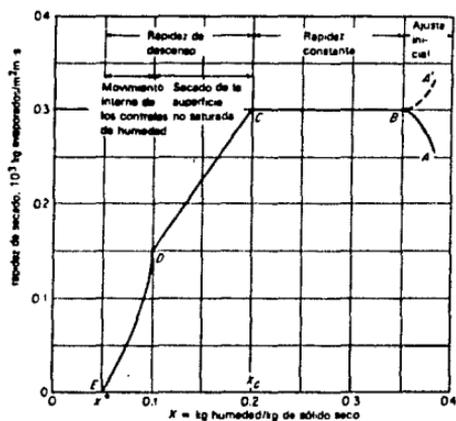
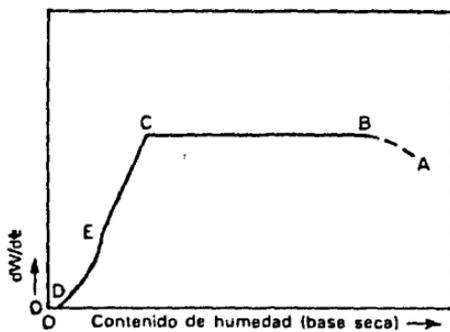


fig (4) Curva típica de rapidez de secado. (Conds. de secado constantes.)



fig(5) Velocidad de secado en función del contenido de humedad del sólido.

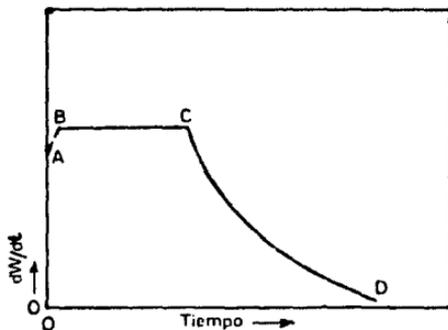


fig (6) Velocidad de secado en función del tiempo de secado.

El punto C, en el cual el período de velocidad de secado constante termina e inicia el de velocidad de secado decreciente, se le conoce como el contenido crítico de humedad.

De acuerdo a los mecanismos de transferencia mencionados anteriormente, podemos establecer la ecuación básica para relacionar la transferencia de masa y la transferencia de calor de la siguiente manera:

$$\frac{W}{A} \frac{dX}{dt} = \frac{dQ}{dt A \lambda}$$

Si expresamos el agua evaporada en función de un coeficiente de transferencia de masa (k_y):

$$\frac{W}{A} \frac{dX}{dt} = k_y (Y_{ss} - Y_g)$$

y el calor cedido en función de los coeficientes de transferencia de calor:

$$\frac{dQ}{dt A \lambda} = \frac{h_R (T_R - T_S) + (h_c + U_K) (T_g - T_S)}{\lambda}$$

Entonces, si definimos la rapidéz de secado como:

$$R = \frac{-W}{A} \frac{dX}{dt}$$

para la misma área de transferencia, tenemos que:

$$R = \frac{h_R (T_R - T_S) + (h_c + U_K) (T_g - T_S)}{\lambda} = k_y (Y_{ss} - Y_g)$$

Por lo tanto, el tiempo total de secado se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$t = \int_0^t dt = \frac{W}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

PERÍODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE

Durante este período, el secado se lleva a cabo mediante la difusión de vapor en el aire desde la superficie húmeda del material y es independiente de los mecanismos internos que suceden dentro del sólido, ya que éstos ocurren lo suficientemente rápido manteniendo una condición saturada en la superficie.

La velocidad de transferencia de calor llega a un equilibrio con la velocidad de transferencia de masa de manera que la superficie saturada permanece a una temperatura constante, la cual generalmente se encontrará entre la temperatura de bulbo húmedo y la del punto de ebullición del agua.

Si se utiliza un gas caliente para suministrarse el calor de evaporación, durante el período de velocidad de secado constante, se llegará a una condición en la que la velocidad de transmisión de calor al material estará en equilibrio con la velocidad de remoción del vapor de la superficie, lo que se expresa en la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{(X_s - X_c) W}{A t} = \frac{h_R (T_R - T_s) + (h_c + U_k) (T_g - T_s)}{\lambda}$$

$$= k_y (Y_{sw} - Y_g) l m$$

Y el tiempo de secado se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{W (X_s - X_c)}{A R_c}$$

Es importante hacer notar que si el sólido que se va a secar es soluble en el líquido del cual será secado, la presión de vapor de la solución será menor a la del líquido puro y generalmente disminuirá la velocidad de secado. Sucede que durante el período de velocidad constante, la temperatura de bulbo húmedo aumenta en proporción igual al aumento de la temperatura de ebu-

llición de la solución y la presión parcial, así como la humedad superficial disminuyen en igual proporción, lo que se puede observar en la gráfica (7). De acuerdo a dicha gráfica, la velocidad constante se expresaría por medio de la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{h_R (T_R - T'_{wb}) + (h_c + U_k) (T_g - T'_{wb})}{\lambda} = k_y (Y'_{sw} - Y_g)$$

donde $T'_{wb} = T_{wb} + T_e$ (Temperatura de bulbo húmedo sobre la sol.) y $T_e =$ incremento en la temperatura de ebullición.

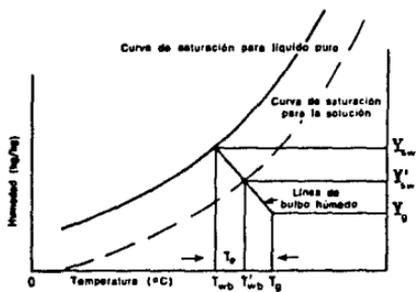
Suponiendo que la relación entre cantidad de calor y la materia no cambia, es decir, que la pendiente de la línea de bulbo húmedo se mantiene constante, Y'_{sw} se lee en cualquier carta psicrométrica, suponiendo que la curva de saturación para la solución es paralela a la del líquido puro.

En los casos normales donde no existe formación de hidratos se puede suponer que la solución es saturada, simplificando los cálculos.

PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE

Cuando la humedad contenida en un sólido alcanza el contenido crítico de humedad, la película de líquido que se encontraba en la superficie durante todo el período de velocidad constante se reduce de tal modo por la evaporación, que aparecen puntos secos sobre la superficie. Estos puntos ocuparán cada vez porciones más grandes de la superficie expuesta al continuar el secado, por lo que la velocidad de secado descenderá dando lugar al período de secado superficial no saturado. Figura (4) (punto C a D).

Posteriormente la película superficial de líquido se evaporará totalmente mientras que el contenido de humedad promedio del sólido estará en el punto D de la Figura (4).



fig(7) Diagrama psicrométrico para una solución.

Conforme prosiga el secado, la velocidad con la que se lleve a cabo éste, dependerá de la rapidéz con la que se desplace la humedad dentro del sólido a causa de los gradientes de contracción que hay entre la superficie y las partes más profundas.

Debido a lo anterior, la velocidad de secado decae aún -- más rápidamente que antes (ver figura 4 del punto D al E).

En el punto E, la humedad del sólido ha descendido hasta el valor en el equilibrio para la humedad del aire en las condiciones predominantes, deteniéndose en ese momento el secado. El período de velocidad de secado decreciente está controlado por varios mecanismos interiores de transferencia de masa de entre - los cuales los más importantes son la difusión de líquidos y la capilaridad.

Durante el período de velocidad decreciente, se ha comprobado que el coeficiente de transferencia de calor permanece prácticamente constante, así que, la baja velocidad de transferencia de calor puede expresarse en función del aumento en la temperatura superficial del sólido desde la temperatura de bulbo húmedo - hacia la temperatura del gas.

En el caso de la transferencia de material, el mecanismo es suponer que la resistencia total a la transferencia aumenta - al disminuir el contenido de humedad, entonces al integrar la -- ecuación básica tendremos:

$$R_f = \frac{hc}{A} \int_0^{T_g - T_{wb}} d(T_g - T_s) = \int_0^{(ky)_c} dKy \int_0^{Y_{sw} - Y_g} d(y_{ss} - Y_g)$$

No es posible resolver la ecuación anterior sin conocer - las funciones, por lo que es más conveniente efectuar esta integración por etapas ó graficamente a partir de una curva de secado determinada experimentalmente.

Entonces, si el secado ocurre bajo condiciones cambiantes de R , se puede calcular el tiempo de secado integrando gráficamente la ecuación siguiente:

$$t = \frac{W}{A} \int_{X_f}^{X_c} \frac{dX}{R}$$

determinando el área bajo la curva de $1/R$ contra X .

En el caso especial de que la curva del período de velocidad decreciente se pueda considerar una recta que llega hasta el contenido de humedad en el equilibrio, la ecuación queda expresada como:

$$R = m (X - X^*) = \frac{R_c (X - X^*)}{(X_c - X^*)}$$

m = Pendiente de la Recta

Cuando la estructura del material a secar es relativamente homogénea, como es el caso de productos orgánicos fibrosos, geles coloides, tortas porosas, etc., la humedad se mueve principalmente por difusión. La velocidad del movimiento se expresa mediante la ecuación de Fick:

$$\frac{dX}{dt} = D_L \frac{d^2X}{dz^2}$$

D_L = Coeficiente de Difusividad del Líquido a través del Sólido

Considerando que D_L es constante, que la distribución inicial del líquido es uniforme y que la forma, tamaño, densidad y contenido de humedad en el equilibrio del material son constantes también, Sherwood y Newman obtuvieron la ecuación siguiente:

$$\frac{X - X^*}{X_c - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 D_L t (\pi/2d)^2 \right] \right]$$

en donde d = mitad del espesor de la placa que se está secando de ambas caras o bien, espesor total de la placa que se está secando de una sola cara.

Para tiempos de secado largo, en donde $D_L t/d^2$ es mucho mayor que 0.1 tenemos que:

$$\frac{X - X^*}{X_C - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-D_L t / d^2)$$

y por lo tanto

$$-\frac{dX}{dt} = \frac{\pi^2 D_L}{4 d^2} (X - X^*)$$

Una relación aproximada para calcular el tiempo de secado durante el período decreciente de secado en materiales que muestran un comportamiento característico de difusión es:

$$t = \frac{4 d^2}{\pi^2 D_L} \ln \frac{8 (X_C - X^*)}{\pi^2 (X - X^*)}$$

Cuando la estructura del sólido a secar es porosa, como es el caso de las camas de sólidos granulares, la humedad se controla por medio del flujo capilar y difusión de vapor, para las cuales la velocidad de secado puede aproximarse asumiendo que la curva decreciente de secado se comporta como una recta.

$$R_f = \frac{R_c (X - X^*)}{(X_C - X^*)}$$

y

$$t = \frac{W (X - X^*)}{A R_c} \ln \frac{X_C - X^*}{X - X^*}$$

Generalmente, en un proceso de secado predomina un mecanismo dado, ya sea la difusión o la capilaridad durante un tiempo determinado, pero se pueden encontrar diferentes mecanismos que predominan en tiempos distintos durante todo el proceso de secado.

Según estudios experimentales se han realizado, como - por ejemplo: el de Hougen, Mc Cauley y Marshall, (trans. Am. --- Inst. Chem, Engrs. 36, 183. 1940) y otros, se han clasificado -- ciertos tipos de materiales en los cuales durante su desecación- predomina el mecanismo de transferencia por difusión y otros en- los que predomina la capilaridad, pudiéndose aplicar respectiva- mente las ecuaciones anteriores para uno y otro caso.

Para el Mecanismo de Difusión tendremos:

1.- Sistemas sólidos de una sola fase (jabón, gelatina, pe gamento, etc.).

2.- Madera y sólidos similares abajo del punto de satura- ción de fibra.

3.- Ultimas etapas del secado textiles, papel, arcilla, só lidos, hidrofílicos y otros.

Por otro lado, los materiales en los que predomina el meca- nismo de capilaridad son por ejemplo:

1.- Los sólidos granulares gruesos (pigmentos, arena, mine- rales, etc.).

2.- Materiales en los que el flujo interior del líquido su cede a concentraciones por encima del contenido de humedad en el equilibrio a la saturación atmosférica o encima del punto de sa- turación de fibra del material en cuestión.

Para poder aplicar las ecuaciones anteriores es necesario- tener el dato del contenido crítico de humedad el cual depende - de la velocidad de secado, del espesor del material, de los fac- tores que influyen en el movimiento de la humedad y de los gra- dientes que resultan de lo anterior dentro del sólido.

Por lo antes expuesto, la estimación teórica del contenido

de humedad en el equilibrio es independiente del método de velocidad de secado pero es una propiedad del material. Exclusivamente los materiales higroscopios presentan ésta característica, ya que los no higroscopios tienen contenido de humedad en el equilibrio igual a cero.

El contenido de humedad en el equilibrio se mide dinámicamente colocando una muestra de un tubo en U, por el cual se extrae un flujo continuo de aire de humedad controlada. La muestra se pesa constantemente hasta llegar al peso constante.

El aire húmedo para realizar esta prueba se obtiene purificando aire seco a través de un volumen grande de solución salina saturada que produce un grado definido de saturación del aire.

Para calcular el tiempo total de secado se pueden determinar los tiempos de secado de velocidad constante y velocidad decreciente, así la suma nos dará la velocidad de secado total.

e) CLASIFICACION DE SECADORES

Con el fin de llevar a cabo la operación de secado cada vez más eficientemente, se han ido desarrollando una gran variedad de tipos de secadores, para cuya clasificación se han sugerido principalmente dos métodos, los cuales se describen a continuación:

1) METODO DE OPERACION

Los secadores se clasifican en:

Intermitentes y Contínuos

El equipo intermitente opera como su nombre lo indica de manera cíclica o en lotes, y en condiciones de estado no estacionario, ya que el secador se carga con el material húmedo y éste permanece en el equipo hasta que seca, entonces se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote.

Este tipo de secador tiene la ventaja de ser muy versátil en sus aplicaciones, relativamente económico en cuanto a inversión inicial y mantenimiento, además de que permite secar diferentes materiales por distintos intervalos de tiempo.

El equipo continuo opera sin interrupciones mientras se le suministre la alimentación del material húmedo. Obviamente estos equipos se pueden operar en forma intermitente si así se desea. Generalmente, los equipos continuos se utilizan para el secado de grandes volúmenes de material húmedo en donde el ahorro en combustible y mano de obra, así como la uniformidad del producto seco justifican la inversión inicial.

2. - METODO DE SUMINISTRO DEL CALOR REQUERIDO PARA LA EVAPORACION DE LA HUMEDAD

Los secadores se clasifican en directos o indirectos; en los secadores directos o por convección, la transmisión de calor se efectúa por contacto directo entre el material húmedo y una corriente de gas caliente, la cual arrastra el líquido evaporado.

Cuando la temperatura del gas caliente es mayor al punto de ebullición del líquido a evaporar, el contenido de vapor del gas tiene un efecto muy ligero en la velocidad de secado y el contenido final de humedad, por lo que el vapor sobrecalentado del líquido que se está separando puede servir también para secar. Debido a lo anterior, para operaciones de secado a temperaturas bajas y humedad del aire altas, a veces es necesario deshumidificar el aire de secado.

En general, la eficiencia de un secador directo aumenta al aumentar la temperatura del gas de entrada a una temperatura de salida constante y al aumentar la humedad contenida en el sólido a desecar.

En los secadores indirectos o por conducción, el calor para evaporación que se transfiere al material húmedo es independiente del gas que se utiliza para acarrear la humedad evaporada. El calor se transfiere por conducción, generalmente a través de una pared de retención en contacto con el material húmedo y la velocidad de secado depende del contacto que se establece entre la superficie caliente y el material húmedo. Estos secadores son apropiados para poder recuperar disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales utilizando atmósferas inertes.

Dentro de esta clasificación podemos incluir otros secadores en los que la transferencia de calor es indirecta, aunque no necesariamente por conducción, tal es el caso de los secadores de calor radiante, en los que el calor se transmite por radiación y el de los secadores de calor dieléctrico, en los que se genera calor dentro de los sólidos colocándolos en un campo eléctrico de alta frecuencia.

Los secadores por radiación o de calor radiante, operan utilizando lámparas infrarrojos, resistencias eléctricas o refractarios incandescentes calentados por gas.

Los secadores dieléctricos se utilizan actualmente en el secado de películas húmedas aplicadas a alambres y cables conductores en donde se aprovechan las ventajas del proceso continuo y de la transferencia de calor del centro hacia afuera del alambre para secar y curar películas de soluciones poliméricas con un acabado superficial excelente.

Los secadores indirectos pueden a su vez subdividirse de acuerdo a si operan a presión atmosférica o con vacío, utilizando los métodos de clasificación anteriormente mencionados, los principales secadores quedarían clasificados como se puede apreciar en la tabla (8).

TABLA No. 8 - CLASIFICACION DE LOS SECADORES

SECADORES DIRECTOS

CONTINUOS

DE TUNEL.- El material colocado en carros o en una banda atraviesa un túnel en contacto con un gas caliente.

ROTATORIO.- El material se rocia dentro de un cilindro rotatorio por el que circula gas caliente.

DE CIRCULACION ATRAVES DEL MATERIAL.- El material se coloca en una malla o placa perforada y se hace pasar gas caliente através de el.

DE LECHO FLUIDIZADO.- El material se fluidifica dentro de un tanque cilíndrico o rectangular. ocasionalmente puede tener bobinas de calor indirecto.

POR ASPERSION.- La alimentación se atomiza mediante un disco centrifugado o una boquilla, poniéndolo en contacto con un gas caliente.

NEUMATICO.- El material es transportado mediante una corriente de gas caliente a alta velocidad hasta llegar a un separador sólido-gas. Por ejemplo: Ciclón

INTERMITENTES

DE BANDEJAS.- El material se coloca en compartimientos dentro de una cabina aislada en la cual se hace circular gas caliente sobre el material húmedo

POR LOTES DE CIRCULACION ATRAVES DEL MATERIAL.- El material se coloca en bandejas con base de tamiz através de las cuales se pasa el gas caliente.

DE LECHO FLUIDO.- El material se fluidifica en un carro estacionario en el cual se coloca un filtro de polvo.

TABLA No. 8 (CONTINUACION) CLASIFICACION DE LOS SECADORES

SECADORES INDIRECTOS

CONTINUOS

DE TAMBOR.- Un tambor sumergido ligeramente en una suspensión o fluido arrastra una película fina al girar. La costra que se forma en la superficie se desprende con cuchillas.

ROTATORIO DE TUBO DE VAPOR.- Un cilindro horizontal provisto de un arreglo de tubos colocados axialmente dentro del cilindro y através de los cuales circula vapor a agua caliente, transfiriendo calor al material húmedo que se halla dentro del cilindro

ROTATORIO.- Un cilindro que gira conteniendo material húmedo es calentado externamente por conducción o radiación.

DE CILINDRO.- 2 o más cilindros rotatorios calentados internamente através de los cuales pasan las hojas continuas del material húmedo.

DE TRANSPORTADOR DE TORNILLO.- Un cilindro horizontal conteniendo material húmedo que es movido por un tornillo sin fin y calentado externamente por conducción o radiación.

DE BANDEJAS VIBRATORIAS.- El material se coloca en bandejas vibratorias dentro de una cabina aislada. Transmittiéndose el calor por conducción o radiación.

INTERMITENTES

ROTATORIO AL VACIO.- El material húmedo se agita bajo una cubierta horizontal y estacionaria, la cual se calienta generalmente con vapor. Normalmente se aplica vacío al sistema y se puede congelar el material antes de secarlo.

SECADOR DE BANDEJAS AL VACIO
El material se coloca en bandejas calentadas por medio de vapor o agua caliente. Generalmente se lleva a cabo en condiciones de vacío.

DE AGITADOR (ALTA VELOCIDAD)
Un cilindro horizontal conteniendo material húmedo es agitado por un arreglo de paletas colocadas en un eje que gira a alta velocidad. El cilindro es calentado externamente.

d) SELECCION DE SECADORES

Una selección adecuada de un secador debe tomar en cuenta los muchos factores que influyen en la operación de secado tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Hoy en día, debido a los altos costos de mano de obra, la tendencia es hacia los equipos de operación continua altamente automatizados, aún así, se deben considerar los aspectos de flexibilidad, fluctuaciones del mercado, cambios de especificación, tipo y calidad de la mano de obra disponible y otros que son de suma importancia en la selección de secadores.

De cualquier manera, la selección de un secador debe llevarse a cabo en dos etapas, una selección preliminar basada en la naturaleza del problema y el material a secar y una selección final basada en pruebas piloto o experiencias previas acompañadas de un análisis económico. Al enfrentarnos a un problema de secado de cualquier tipo, un razonamiento de selección preliminar consistirá en lo siguiente:

	<u>PRODUCCION</u>	<u>SECADO</u>
CANTIDAD	PEQUEÑA	POR LOTES
	MEDIANA	POR LOTES O CONTINUO
	GRANDE	CONTINUO
OPERACION DEL PROCESO ANTERIOR AL SECADO	INTERMITENTE	GENERALMENTE POR LOTES
	CONTINUA	CONTINUO
OPERACION AL PROCESO POSTERIOR AL SECADO	INTERMITENTE	POR LOTES
	CONTINUA	CONTINUO

El secador que resulte de esta primera etapa de selección, deberá someterse al análisis de los siguientes factores:

- Propiedades del material en la alimentación, durante el proceso y a la salida del secador, junto con la toxicidad, flama- bilidad, corrosividad y efectos de abrasión.

- Características de secado del material a manejar, como - el contenido inicial de humedad en relación con el contenido crí- tico de humedad, tipo de humedad, temperatura máxima permisible y tiempo estimado de secado en base a experiencias previas. (Ver ta bla que indica la probable selección de secadores en base al mate rial a secar) Tabla (9).

- Especificaciones del producto seco deseado, incluyendo - su pureza, estabilidad de sus propiedades, contenido final de hu- medad, análisis dimensional, densidad y posible contaminación.

- Pérdidas y recuperación de polvo o solventes.

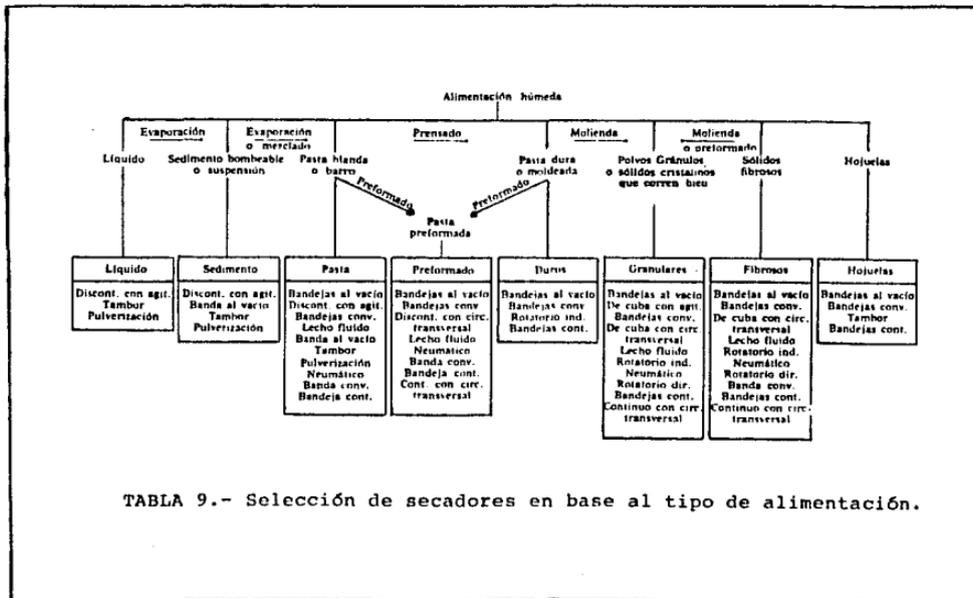
- Disponibilidad de espacio, energía, alimentación de gas- caliente o vacío y restricciones en los efluentes.

- Costo del secador y equipo auxiliar, posibilidad de aho- rro en procesos anteriores o posteriores e información sobre el - comportamiento, duración y mantenimiento de secadores similares - en operaciones similares.

La selección final de un secador debe ser realizada basán- dose en pruebas piloto que indicarán el diseño y las condiciones- óptimas considerando a su vez costos reales de inversión y opera- ción, los cuales pueden ser considerablemente mayores a los cos- tos calculados durante el diseño preliminar.

e) SECADORES DE TUNEL

Los secadores de túnel son básicamente una adaptación de - los secadores de bandejas o compartimientos para operar en forma- continua.



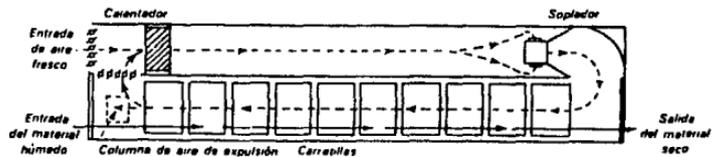
El secador consiste principalmente en un túnel, através -- del cual se desplaza el material que se desea secar poniéndose en contacto con un gas caliente que fluye también dentro del túnel y que arrastra la humedad evaporada.

El material húmedo, puede transportarse en bandejas, com--partimientos individuales, carros, carretillas, etc., o también - sobre bandas que circulan a lo largo del túnel.

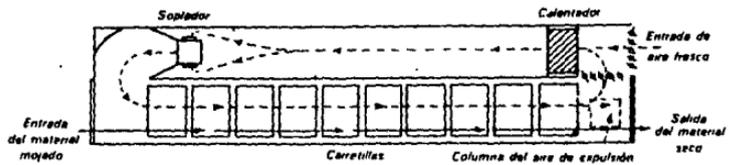
En algunos casos, las carretillas se desplazan sobre rie--les o carriles y usualmente se transportan mecánicamente con propulsores de cadena conectados a la base de cada carretilla. El - transporte del material sobre una banda es un proceso realmente - contínuo, ya que el material se dosifica en un tubo a la entrada del secador y se extiende en la banda en forma de placa con un espesor controlado para el caso de granos o partículas pequeñas.

La banda puede ser metálica, elastomérica, de fieltro, de--malla o de tela y pueden existir arreglos de 2 o más bandas ope--rando a diferentes velocidades y direcciones. El gas caliente, - que normalmente es aire, puede circular a contracorriente o en corriente paralela a la dirección del material. Ver figura (10) y (11). También puede darse el caso de una combinación de corrient--e paralela y contracorriente como en la figura (12) o de flujo - transversal figura (13).

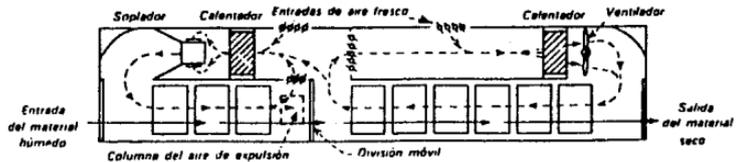
En estos equipos, el gas caliente se puede recircular por--medio de ventiladores através de serpentines de recalentamiento - instalados en los puntos más convenientes, así se puede mantener--una temperatura constante durante el secado. Estos secadores, -- tienen la mayor flexibilidad para el manejo de combinaciones de - corrientes de gases y para el escalonamiento de temperaturas a lo largo del túnel.



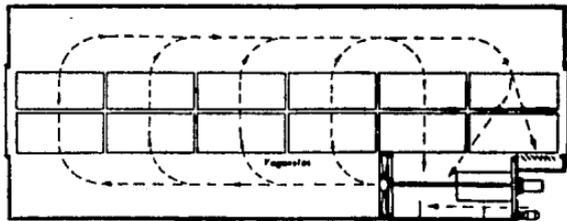
fig(10) Secador tipo túnel con flujo a contracorriente.



fig(11) Secador tipo túnel con flujo a ccorriente.



Fig(12) Secador tipo túnel con flujo combinado.



fig(13) Secador tipo túnel con flujo transversal.

En algunos diseños los solventes evaporados del material húmedo se queman con la ayuda de catalizadores, posteriormente se recirculan los gases de combustión a una temperatura muy alta combinándose con el gas de alimentación para conseguir la temperatura requerida.

El gas de secado se calienta por medio de quemadores, serpentines aletados de vapor, resistencias eléctricas y otros medios menos comunes dependiendo de las temperaturas requeridas y de las características de la operación. Por lo general para operaciones a temperaturas relativamente bajas el gas se calienta por medio de vapor, pero para temperaturas más elevadas y si la operación lo permite, se utilizan gases de combustión. En las operaciones a temperaturas elevadas la radiación como fenómeno de transferencia de calor tiene una influencia considerable, por lo que el diseño del secador debe también incluir una selección adecuada de los materiales de construcción.

Hay muchas modificaciones del secador de túnel que son básicamente iguales en principio pero diferentes en el diseño de los detalles debido a la naturaleza del material que se va a secar. Por ejemplo, las madejas de estambre pueden suspenderse en perchas o caballetes que se mueven através del secador, los cueros se extienden en armaduras que cuelgan de cadenas conductoras; los materiales en hojas continuas, como telas, pueden moverse bajo tensión como en un cinturón continuo sobre una serie de rodillos.

Las aplicaciones de los secadores de túnel son, como ya se mencionó, las más amplias en la industria, ya que prácticamente incluyen todas las formas de sólidos, conglomerados y objetos sólidos de cualquier tamaño. En cuanto a la operación, son los más apropiados para producciones a escala industrial debido a la economía que se puede lograr ya sea en inversión e instalación o en-

costos de operación y mano de obra. Los secadores de túnel tienen una gran versatilidad para el manejo de muy diversos materiales, así podemos citar un sin número de aplicaciones típicas de éste tipo de secadores, entre los cuales tenemos por ejemplo, el secado de:

Bióxido de Titanio

Oxido de Plomo

Litopón

Papel Tapiz Impreso

Placas de Fibra

Pieles Curtidas

Artículos Moldeados de Pulpa de Papel

Cajas de Cartón

Laminados Decorativos de Papel Impregnado

Vegetales

Frutas, Nueces

Pectina

Granos

Cereales

Artículos Sanitarios, Eléctricos y Moldeados Artesanales -
de Cerámica

Fibra Corta Textil

Telas en Hojas Continuas Bajo Tensión

Alfombras

Textiles Acabados

Fármacos Cristalinos

Químicos Finos en Polvo

Minerales Metalúrgicos

CAPITULO I I

DISEÑO DEL SECADOR DE TUNEL

A) FUNDAMENTOS TEORICOS

En un secador de túnel, ya sea que trabaje con el material sobre una banda o sobre charolas, éste se encuentra estacionario-respecto de la banda o las charolas, de manera que el sistema es análogo al de soplado de aire sobre una capa estacionaria de material, manteniendose las ecuaciones básicas de transferencia instantánea de calor y de materia.

La superficie de secado es, en general, idéntica a la de la banda de secado, entonces para el período de velocidad constante, la ecuación de trabajo es:

$$R_c = \frac{10^3 (X_s - X_c) W}{A_c \tau_c} = k_y (Y_{sw} - Y_g) l m$$

$$= \frac{h_R (T_R - T_s) + (h_c + U_k) (T_g - T_s)}{\lambda}$$

y el área de secado :

$$A_c = \frac{(X_s - X_c) W}{R_c \tau_c}$$

El efecto de la velocidad del aire en el secado puede deducirse a partir de los datos disponibles de transferencia de calor. Para el flujo paralelo a una superficie y confinado entre platos-paralelos, los coeficientes de transferencia h_c y k_y se relacionan mediante la aplicación de la analogía de la transferencia de calor - masa, para un $Re = 2600$ a 22000 , se tiene que:

$$J_H = \frac{h_c}{C_p G} Pr^{2/3} = J_D = \frac{k_y}{G_s} Sc^{2/3} = 0.11 Re^{-0.29}$$

en donde $Re_e = d_e G / \mu$ y $d_e =$ Diámetro equivalente para el Flujo de Aire

Tomando las propiedades del aire a 95° C, se tiene:

$$h_c = 5.9 G^{0.71}/d_e^{0.29}$$

en donde, en un estudio detallado del secado de arenas sobre platos hechos por Shepherd, Haddock y Brewer encontraron que:

$$h_c = 14.3 G^{0.8}$$

entonces, para el sistema aire - agua, cuando R_c y G están expresados en g/seg. m^2 , es suficientemente aproximado tomar:

$$R_c = 0.052 G^{0.8} (Y_{sw} - Y_g) \text{ lm}$$

La variación en el espesor del lecho afectará el contenido de humedad crítica y variará la forma de la curva de secado a velocidad decreciente. En general, a menor espesor del lecho, menor el contenido de humedad crítica y mayor es la proporción del secado a velocidad constante.

El balance de humedad para un secador continuo a contracorriente como el de la figura (14), quedaría expresado mediante la siguiente ecuación:

$$W_s X_1 + G_s Y_2 = W_s X_2 + G_s Y_1$$

en donde W_s = Flujo de Masa de Sólido Seco/Tiempo Area

G_s = Flujo de Masa de Gas Seco/Tiempo Area

X_1 = Masa de Humedad del Sólido/Masa de Sólido Seco (entrada)

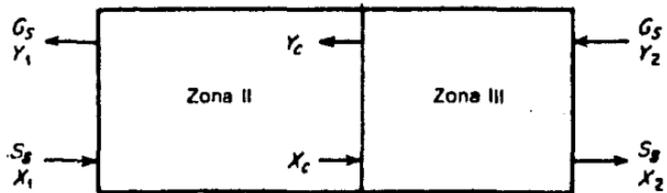
X_2 = Masa de Humedad del Sólido/Masa de Sólido Seco (salida)

Y_1 = Masa de Humedad del Gas/Masa de Gas Seco (salida)

Y_2 = Masa de Humedad del Gas/Masa de Gas Seco (entrada)

y el balance de entalpía para el mismo secador sería:

$$W_s H'_{s1} + G_s H'_{g2} = W_s H'_{s2} + G_s H'_{g1} + Q'$$



fig(14) Diagrama de flujo de materiales en un secador continuo a contracorriente.

en donde: $H'_S = c_S(T_S - T_0) + X c_A(T_S - T_0) + \Delta H_A$

H'_S = Entalpía del Sólido Húmedo a T_S con respecto al sólido y líquido a la temperatura de referencia t_0 .

c_S = Capacidad Calorífica del Sólido Seco

c_A = Capacidad Calorífica de la Humedad como líquido.

ΔH_A = Calor de Humidificación con referencia al líquido y sólido puros en t_0 .

Q' = Pérdida neta de calor.

Si el suministro de calor al secador es mayor a las pérdidas caloríficas, Q' es negativa y en las operaciones adiabáticas, Q' es igual a cero.

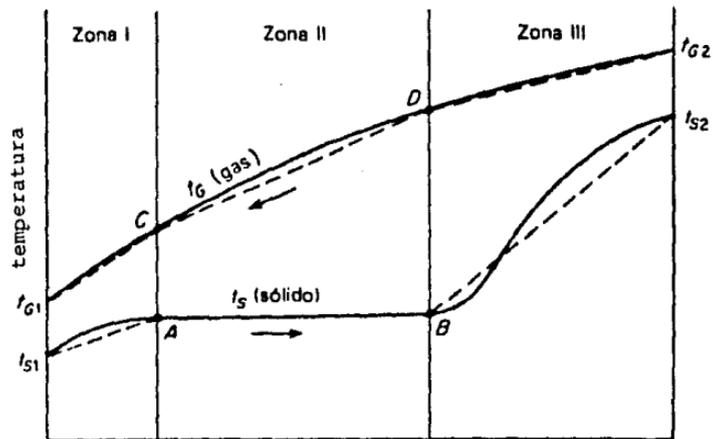
Para el flujo a contracorriente se pueden establecer las correcciones necesarias en los subíndices o los signos.

Para un adecuado estudio de este tipo de secadores, es conveniente como se mencionó anteriormente, dividirlos en dos categorías, según si operan a una temperatura mayor o menor a la temperatura de ebullición del líquido a evaporar.

En el primer caso, el secador se divide en tres zonas, como se ve en la figura (15). En la Zona I ó de precalentamiento - el sólido se calienta mediante el gas hasta que la transferencia de calor llega a un equilibrio con el calor requerido para la evaporación del líquido. En la Zona II, la temperatura del sólido permanece constante, evaporándose la humedad superficial y la no ligada. En la Zona III, se realiza el secado de la superficie no saturada y la evaporación de la humedad ligada.

Despreciando la transferencia de calor entre el sólido y el secador, el balance diferencial de calor para una longitud diferencial del secador dZ , quedaría expresado de la siguiente manera:

$$dq_g = dq + dQ'$$



distancia a través del secador.

fig(15) Perfil de temperaturas en secador continuo a contracorriente.

despejando la transferencia de calor al sólido tenemos:

$$dq = dq_g - dq' = UdS (T_g - T_s) = Ua (T_g - T_s) dZ$$

en donde U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor entre el Gas y el Sólido

S = Superficie Interfacial/Sección Transversal -- del Secador.

a = Superficie Interfacial/Volumen del Secador.

entonces

$$dq = G_s c_H d T_g' = Ua (T_g - T_s) dZ$$

$$y \quad dN_{\text{tog}} = \frac{dT_g'}{T_g' - T_s} = \frac{Ua dZ}{G_s c_H}$$

en donde dT_g' es la caída de temperatura del gas como resultado de la transferencia de calor al sólido, despreciando las pérdidas. Por lo tanto, si consideramos el coeficiente de transferencia de masa constante:

$$N_{\text{tog}} = \frac{\Delta T_g'}{\Delta T_m} = \frac{Z}{H_{\text{tog}}}$$

$$H_{\text{tog}} = \frac{G_s c_H}{Ua}$$

en donde N_{tog} = Número de Unidades de Transferencia de Calor.

H_{tog} = Longitud de la Unidad de Transferencia de Calor.

T_g' = Cambio en la Temperatura del Gas debido a la Transferencia de Calor unicamente hacia el Sólido.

T_m = Diferencia de Temperatura Promedio adecuada entre el Gas y el Sólido

En el caso de operación a temperaturas inferiores a la de ebullición del líquido, la humedad superficial se evapora a una temperatura relativamente baja en la Zona II y por lo tanto la zona de precalentamiento se puede despreciar y las Zonas II y III se encuentran divididas por el valor crítico.

La rapidéz de secado en la Zona II sería constante de no ser por las condiciones cambiantes del gas.

Si consideramos un arreglo a contracorriente como el de la figura (14), el tiempo de secado en la Zona II es:

$$t_{II} = \frac{W_s}{A} \int_{X_c}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

y como

$$R = ky (Y_s - Y_g) \text{ y } W_s dX - G_s dY$$

entonces:

$$t_{II} = \frac{G_s W_s}{W_s A ky} \int_{Y_c}^{Y_1} \frac{dY}{Y_s - Y_g}$$

Obviamente, se debe tomar en cuenta la variación de Y_s , humedad del gas en la superficie sólida con respecto a Y . En el caso del secado adiabático de agua en aire, Y_s es constante y por lo tanto

$$t_{II} = \frac{G_s W_s}{W_s A ky} \ln \frac{Y_s - Y_c}{Y_s - Y_1}$$

El cálculo matemático en la Zona III es más complicado, -- por lo que es necesario una simplificación, como lo es el considerar la curva decreciente como una línea recta, en este caso, la rapidez de secado depende exclusivamente de las condiciones predominantes en cualquier momento, independientemente de como haya sido hasta entonces el secado, entonces:

$$t_{III} = \frac{W_s}{A} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{Rf}$$

y si

$$Rf = \frac{Rc (X - X^*)}{X_c - X^*} \quad \text{y } Rc = ky (Y_s - Y_g)$$

substituyendo, tenemos:

$$t_{III} = \frac{W_s (X_c - X_2)}{A ky} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{(Y_s - Y_g) (X - X^*)}$$

aplicando el balance de materia tenemos que

$$G_s dY = W_s dX$$

y también que

$$X = \frac{(Y_g - Y_2) G_s}{W_s} + X_2$$

así que para el secado adiabático, donde Y_s es constante y si además X^* es despreciable, tendremos que:

$$t_{III} = \frac{G_s W_s X_c}{W_s A k_y} \int_{Y_2}^{Y_c} \frac{dY}{(Y_s - Y_g) \left[(Y_g - Y_2) \frac{G_s}{W_s} + X_2 \right]}$$

e integrando:

$$t_{III} = \frac{G_s W_s X_c}{W_s A k_y (Y_s - Y_2) (G_s/W_s) + X_2} \ln \frac{X_c (Y_s - Y_2)}{X_2 (Y_s - Y_c)}$$

Otro método consiste en suponer que el contenido de humedad crítica y la forma de secado a velocidad decreciente son independientes de las condiciones de secado, lo que es bastante aproximado para materiales térmicamente estables y para cambios moderados en las condiciones ambientales de secado.

En este caso se utiliza un coeficiente de secado basado en el cociente de las fuerzas impulsoras medias de temperatura y humedad, el cual permanece constante al cambiar las condiciones de secado.

El procedimiento consiste en:

Paso 1.- Calcular los coeficientes de secado para una serie de velocidades instantáneas de secado correspondientes a distintos contenidos de humedad del período decreciente de velocidad en ciertas condiciones de secado.

Paso 2.- Para las nuevas condiciones de secado deseadas, se obtiene la velocidad instantánea de secado pa-

ra cada una de las series de valores de contenido de humedad. Posteriormente se representa la velocidad de secado en función del contenido de humedad, obteniéndose una curva que al integrarse nos dá la humedad en función del tiempo.

Debe tenerse mucho cuidado al aplicarse estos métodos, ya que en sólidos en donde la difusión interna controla la rapidéz de secado, las variaciones pueden ser considerables, siendo más conveniente aplicar la ecuación de Sherwood y Newman.

De cualquier manera, debe tenerse en mente que éstos métodos son aproximaciones y que los datos experimentales son siempre lo más conveniente para los cálculos de secado, por lo que en la práctica es recomendable realizar experimentos dentro del rango de las condiciones que se encontrarán en las zonas del secador a construir.

En la actualidad, las características particulares del secado de la mayor parte de los productos aún no están perfectamente determinados e inclusive para muchos son muy incompletos, por lo cual, las indicaciones generales para la desecación no son aplicables a cada una de las diversas instalaciones y condiciones de operación que se pueden encontrar, ya sea de materiales orgánicos e inorgánicos.

Debido a lo anterior, cada tipo de secador tiene una determinada capacidad de desecación, por lo tanto, aunque en la mayoría de los secadores de túnel es posible desecar casi cualquier clase de material, no se obtiene igual rendimiento en todos los casos, por este motivo el operador de un secador tendrá que determinar experimentalmente las características específicas de secado y combinarlas con las condiciones particulares del equipo para poder obtener la más alta producción, dentro de la calidad requerida y al menor costo posible, en el caso de una producción a nivel industrial.

El diseño de un secador puede partir de las características de secado de un material específico o de una serie de datos de materiales que se requieren secar, en este último caso, el secador se construirá para un rango de condiciones de operación que incluya a todos los materiales pero orientado hacia obtenerse el mayor rendimiento durante el secado de los materiales de las que se requiere la mayor producción.

El rendimiento térmico de secador será mayor cuando más alta sea la temperatura y se expresa de la siguiente manera:

$$N = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_a} 100$$

donde N = Rendimiento Total Térmico en Porcentaje

T_1 = Temperatura del Aire al entrar al Secador

T_2 = Temperatura del Aire al salir del Secador

T_a = Temperatura del Aire en el Exterior

Una condición importante para la obtención de un alto rendimiento térmico es la uniformidad de la velocidad del aire en todas las secciones del secador.

Así también, la efectividad de la evaporación es:

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{SI}} 100$$

en donde T_{SI} = Temperatura de Saturación del Aire al entrar al Secador

Generalmente, para que el secado sea económico, es necesario recircular el aire para reducir el calor perdido con el aire que abandona el secador por lo que se hace recircular entre un 50 y 75% de éste, el cual se calienta hasta la temperatura de entrada junto con el aire fresco, obteniéndose un ahorro considerable de energía.

La relación entre la recirculación y la descarga del aire de secado está limitada por las condiciones de humedad y temperatura del aire permitidas para el secado adecuado de un cierto material, por ejemplo, para el secado de cebollas, la humedad relativa de 30% de aire a 71° C es demasiado elevada, pero en el caso de materiales de secado lento como las uvas, el aire con la humedad relativa ordinaria y pasando una sola vez, no llega ni a la quinta parte de su capacidad de absorción, a menos que el secador sea excesivamente largo o que la velocidad del aire sea demasiado lenta.

La progresión del secado es afectada por una serie de variables, entre ellos, una de las más importantes es la temperatura, ya que se va elevando a cada nueva posición de éste y desde luego, la progresión de la evaporación disminuye hasta que al final del túnel la temperatura se aproxima a la del aire. Esta progresión se puede apreciar en la figura (16).

La relación entre la temperatura máxima del aire y la humedad relativa del mismo en el secador de túnel a contracorriente - se puede ejemplificar por medio de la tabla (17), en una aplicación del secado de frutas.

En el secado de muchos materiales, como es el caso de los alimentos y de productos químicos, es muy importante no exceder la temperatura de degradación, por lo que en ocasiones se utilizan dos etapas; la primera a corriente paralela y la segunda a contracorriente, en la primera la temperatura es más alta ya que el sólido se mantiene a una temperatura muy inferior, debido a la intensa evaporación y además se mantiene protegido de los efectos nocivos del calor. De esta manera se puede reducir el tiempo de secado considerablemente.

La temperatura de degradación (en ocasiones llamada temperatura crítica) está dada generalmente para una cierta humedad --

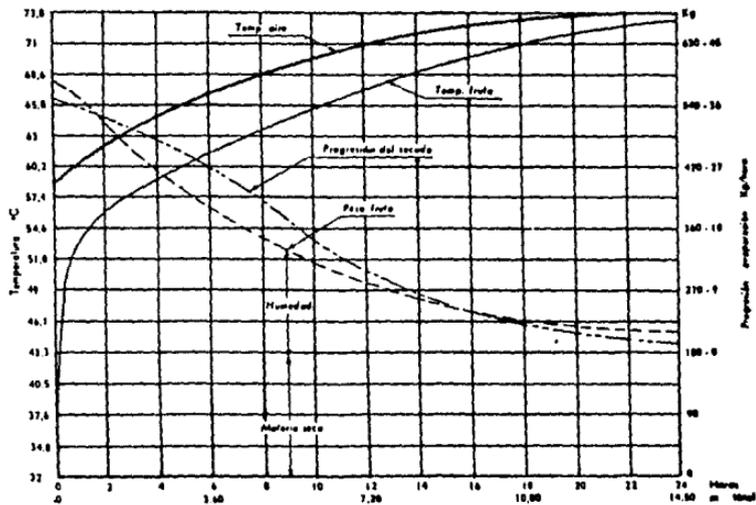


fig (16) Variación de la temperatura en función de la progresión del secado en un secador tipo túnel normal.

FRUTAS	GRADOS CENTIGRADOS	HUMEDAD RELATIVA
peras	60	
albaricoques	69	no
melocotones sin hueso	69	inferior
melocotones con hueso	71	al
ciruelas	75	25%
uva	66	

TABLA (17) Temperatura máxima del aire en un secador tipo túnel normal.

del aire, por ejemplo para la zanahorias la temperatura es de 71° C, pero a un 30% de humedad relativa, para las papas también es de 71° C pero a una humedad del 8 al 10% y de 69% si la humedad es del 30%.

La degradación puede reflejarse en alteraciones en las propiedades físicas o químicas del producto como por ejemplo en el calor, sabor, aroma, resistencia mecánica, etc.

Durante la desecación también se puede presentar el acortamiento de la piel el producto que se está secando, en este caso, la experiencia ha demostrado que en la mayoría de los casos es -- preferible mantener baja la humedad relativa para poder aumentar la velocidad de secado.

La cantidad de sólido por área alimentado al secador influye directamente el tiempo de secado. Para cada material, existe una carga óptima, a la cual se obtiene la mayor producción por -- unidad de tiempo, la cual se determina experimentalmente. Las características particulares de cada material afectan el secado de diferentes maneras por ejemplo: las zanahorias durante el secado tienden a separarse una de otra, sin embargo las papas, la col y las espinacas tienden al amazotamiento retardando el secado al reducirse el área expuesta al aire. En la tabla (18) se puede -- ejemplificar lo mencionado, ya que la carga óptima para las espinacas en un experimento realizado en un secador de túnel fué de 3.5 kg/m² y para las zanahorias fué de 8 kg/m².

KILOGRAMOS	ESPINACAS HORAS	ZANAHORIAS HORAS
9	11	11
7	8.5	10.
5.5	6.5	9
4.5	5.5	9
3.5	3.5	8

TABLA (18) Influencia de la carga sobre el tiempo de secado en un secador tipo túnel normal.

B) CALCULO DEL SECADOR

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó un secador de túnel debido principalmente a su gran versatilidad tanto para el manejo de diversos materiales como para la variación en las condiciones de operación, para lo cual es necesario que el equipo sea capaz de:

- Funcionar de manera continua, semicontinua e intermitente.
- Operar con la corriente de aire de manera paralela o a contracorriente con respecto al flujo de material.
- Operar adiabáticamente
- Manejar una amplia variedad de materiales de diversas características, entre ellos alimentos; ya sea sobre charolas o en forma de placa sobre una banda.
- Variar el flujo del aire desde el régimen laminar hasta el turbulento.
- Variar la temperatura del aire desde la temperatura ambiente hasta los 110 °C , manteniéndose constante en cualquier punto dentro de este rango.
- Permitir la recirculación del aire de secado.

De acuerdo a lo anterior, se seleccionó un secador de túnel que puede operar también como un secador por convección de banda maciza y como un secador de bandejas.

El sistema de calentamiento es aire calentado mediante resistencias eléctricas. Este método no es el mas económico pero presenta las ventajas de ser bastante exacto en cuanto al control de la temperatura y también de ser muy seguro y de muy fácil manejo.

Otras opciones tales como los quemadores de gas, los quemadores diesel y los serpentines de vapor, se descartaron debido al peligro del manejo de gas dentro de un laboratorio, a los problemas de suministro e inventario y a la dependencia del encendido de una caldera muy grande para el funcionamiento cotidiano del secador.

Generalmente, un secador se diseña para el secado de un material específico, calculándose el equipo de acuerdo a las especificaciones del producto que se desea obtener y contando para ello con datos completos acerca de las características y del comportamiento del material que se alimentará al secador.

En nuestro caso, debido a que nuestro secador manejará una gran variedad de materiales de muy diversas características y comportamientos durante su secado, el equipo se diseñará partiendo de datos que involucren al mayor número posible de los materiales que se manejarán en la realización de prácticas sobre secado y en trabajos de investigación, por lo tanto los datos utilizados para el cálculo del equipo serán en algunos casos, valores máximos o mínimos que delimiten un rango de operación.

Estableciendo para nuestro secador de laboratorio las dimensiones convenientes para los fines didácticos pero con la capacidad suficiente para realizar trabajos de investigación, tendremos lo siguiente:

largo efectivo del túnel	4.00 metros
altura del túnel*	0.36 "
ancho del túnel*	0.42 "

* Estas dimensiones están también determinadas por la disponibilidad de los materiales de construcción.

De acuerdo a las dimensiones establecidas para el túnel se puede entonces, lógicamente, fijar los siguientes datos:

altura de cada charola	1.5 cms.
espaciamiento entre charolas	5.5 cms.
dimensiones de las charolas	30*30 cms.
número de charolas por vagoneta	5
número de vagonetas en el túnel	10

Si consideramos que la carga máxima conveniente de sólido por charola es de 1350 gramos ($30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 1.5\text{cm} = 1350\text{cm}^3 \times 1\text{g}/\text{cm}^3 = 1350\text{g}$) tendremos que:

$$\begin{array}{l} \text{carga máxima} \\ \text{dentro del} \\ \text{túnel} = \end{array} \left(1.35 \frac{\text{kgs}}{\text{charola}} \right) \left(\frac{5 \text{ charolas}}{\text{vagoneta}} \right) \left(\frac{10 \text{ vagonetas}}{\text{túnel}} \right) = 67.5\text{kgs.}$$

que corresponde a una carga por área expuesta al secado de:

$$\left(1.35 \frac{\text{kgs}}{\text{charola}} \right) \left(\frac{\text{charola}}{0.30 \times 0.30\text{mts}} \right) = 15 \text{ kgs}/\text{m}^2$$

Por otro lado, una velocidad típica del aire dentro de este tipo de secadores es de 5 metros/seg. la cual es muy conveniente para el secado de un gran número de materiales y principalmente de alimentos. Esta conveniencia está basada principalmente en términos de gasto de energía por cantidad de producto seco.

Como ya se explicó anteriormente, el hecho de manejar aire a una velocidad mayor puede reducir significativamente el tiempo de secado durante el periodo de secado constante pero no así durante el periodo de secado decreciente.

De igual manera, una temperatura típica del aire para este tipo de secadores es de 60°C sobre todo cuando se manejan productos orgánicos así como alimentos. Las temperaturas más altas disminuyen el tiempo de secado pero están restringidas por la resisten-

cia del material que se está secando y por la de los materiales de construcción.

Entonces, para el caso de que el material se transporte en charolas sobre vagonetas, el área libre para el flujo del aire es:

$$\begin{aligned}
 \text{AREA TOTAL} &= (0.42 \times 0.36) \text{mts.} = 0.1512 \text{ m}^2 \\
 \text{AREA OCUPADA POR} \\
 \text{VAGONETAS Y POR CHAROLAS} &= 5(0.30 \times 0.30) \text{mts.} = 0.0225 \\
 &+ 2(0.31 \times 0.01) \text{mts.} = \frac{0.0062}{0.0287 \text{ m}^2} \\
 \text{AREA LIBRE DE FLUJO} &= 0.1512 - 0.0287 \text{ m}^2 = 0.1225 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

En este caso el flujo de aire necesario es de:

$$VA = (5 \text{ mts/seg})(0.1225 \text{ m}^2)(3600 \text{ seg/hr}) = 2205 \text{ m}^3/\text{hr.}$$

Este flujo de aire, aplicando un factor de fricción de 1.5 mm de agua/m de tunel de la tabla (19) para 14 kg/m², nos da una caída de presión de:

$$\Delta P = FL \left(\frac{V}{3} \right)^2 = (1.5)(4) \left[\frac{(2205/0.42 \times 0.36 \times 3600)}{3} \right]^2 = 10.94 \text{ mm de agua.}$$

y la fuerza motriz requerida para impulsar el aire con un ventilador de un 50% de rendimiento es:

$$HP = \frac{G \Delta P}{75 E} = \frac{(2205 \text{ m}^3/\text{hr})(10.94 \text{ mm agua})}{75(0.5)} = 0.1787 \text{ HP}$$

y de acuerdo a las dimensiones de las vagonetas y las charolas, el diámetro equivalente sería:

$$de = 4 R_H = 4 \frac{\text{área de flujo}}{\text{perímetro mojado}}$$

TIPO DE CARGA	FACTOR DE FRICCIÓN mm agua/metro de túnel
bandejas vacías	0.8
ciruelas 14 kg/m ²	1.5
melocotones 12 kg/m ²	1.4
uva	1.7
uva	2.5

TABLA (19) Factor de fricción para diferentes tipos de carga en un secador de túnel normal.

$$\begin{aligned}
 \text{perimetro mojado} &= 2(0.42+0.36) &= 1.56 \text{ mts.} \\
 &5(0.30+0.55)*2 &= 3.55 \text{ " } \\
 &0.31+0.31+0.30 &= 0.92 \text{ " } \\
 &\text{total} &= \underline{6.03 \text{ mts.}}
 \end{aligned}$$

entonces

$$d_e = \frac{4(0.1225)}{6.03} = 0.0813 \text{ m}$$

luego el numero de Reynolds es:

$$\text{Re} = \frac{Dv_f}{\mu} = \frac{(0.0813 \text{ m}) \left(\frac{2205 \text{ m}^3/\text{hr}}{3600 \text{ seg/hr} * 0.1225 \text{ m}} \right) (1.2 \text{ kg/m}^3)}{(1.8 * 10^{-4} \text{ kg/m seg})} = 27100$$

el cual para una rugosidad del material a secar por encima de 0.0135 nos sitúa en el área de flujo turbulento (ver fig A-24 de ref. bibl.No.1). Esta rugosidad está dentro del rango de de muchos materiales de origen orgánico e inorgánico tales como el concreto y muchos alimentos. (ver fig. A-23 de ref. bibl. No.1).

El calor que se requiere aplicar al aire alimentado para elevar su temperatura hasta la de entrada al túnel es, considerando un promedio en la Cd. de México de 20°C y 70% de humedad relativa:

$$\left(\frac{2205 \text{ m}^3/\text{hr.}}{0.90 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aH}} \cdot 1.01 \frac{\text{kg aH}}{\text{kg aS}}} \right) 1+1.87(0.01) \frac{\text{KJ}}{\text{kg} * \text{K}} (60-20^\circ\text{K}) = 98844.16 \frac{\text{KJ}}{\text{hr}}$$

$$= 27.46 \text{ kW-hr}$$

La cantidad total de calor que se debe proporcionar al aire alimentado es la suma del calor requerido para realizar todas las operaciones de transferencia que se llevan a cabo durante el proceso de secado, por lo que para poder verificar si la cantidad de calor calculada anteriormente es suficiente, debemos suponer un proceso de secado que demande la mayor cantidad de calor dentro de nuestra capacidad delimitada.

Si consideramos una reducción máxima de humedad del sólido del 70% (0.7 kg de agua/kg sólido húmedo) para un periodo de secado de 10 horas continuas, el agua a evaporar es:

$$\text{kgs. de agua removidos/hr} = 67.5 \text{ kg}(0.7)/10 \text{ hrs} = 4.725 \text{ kg/hr.}$$

y el cambio de humedad en el aire de secado sería:

$$G_s(Y_2 - Y_1) = \frac{w}{t} (X_1 - X_2)$$

$$(Y_2 - Y_1) = \frac{67.5 \text{ kg} (0.7)}{10 \text{ hrs}} \left(\frac{2205 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.9 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aH}}} \cdot \frac{1.01 \text{ kg aH}}{\text{kg aS}} \right) = 0.00195 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aS}}$$

Este cambio de humedad nos da una variación de la temperatura de 5°C por lo que la eficiencia térmica (en este caso la mínima) sería:

$$N = \frac{60 - 55}{60 - 20} = 12.5\%$$

En este caso la cantidad de calor que se le debe proporcionar al sistema es la suma del calor requerido para realizar las siguientes operaciones:

- a) Llevar la humedad contenida en el sólido hasta la temperatura de ebullición:

$$4.725 \text{ kgs de agua/hr} (4.1868 \text{ kJ/kg K}) (55 - 20 \text{ °K}) = 692.39 \text{ kJ/hr}$$

- b) Llevar el material móvil del secador y el peso seco del sólido hasta la temperatura media del aire en el interior del secador.

1) material móvil:

$$\left(\frac{\text{túnel}}{10\text{hrs}}\right) \left(\frac{1.3 \text{ kg}}{\text{vagoneta}}\right) \left(\frac{10\text{vagoneta}}{\text{túnel}}\right) \left(\frac{0.47\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}\right) \left(\frac{60+55}{2} - 20\right) = 22.91 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

2) producto seco:

$$\left(\frac{67.5 \text{ kg sH}}{\text{túnel}}\right) \left(\frac{\text{túnel}}{10\text{hrs}}\right) \left(\frac{0.3 \text{ kg ss}}{\text{kg sH}}\right) \left(\frac{0.47 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}\right) \left(\frac{60+55}{2} - 20\right) = 35.69 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

c) Evaporar el agua contenida en el sólido.

$$\left(\frac{4.725 \text{ kg de agua}}{\text{hr}}\right) \left(\frac{539.84 \text{ kcal}}{\text{kg de agua}}\right) \left(\frac{4.1868 \text{ kJ/kg}}{1 \text{ kcal/kg}}\right) = 10679.45 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

d) Difusión de la humedad a través del sólido.
(10% de la requerida para la evaporación).

$$(10679.45 \text{ kJ/hr}) 0.10 = 1067.94 \text{ kJ/hr}$$

e) Pérdidas de calor por radiación.
(3% de la requerida para la evaporación).

$$(10679.45 \text{ kJ/hr}) 0.3 = 320.38 \text{ kJ/hr}$$

f) Pérdidas de calor sensible con el aire de descarga del secador y con las vagonetas.

Aire:

$$\left(\frac{2205 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.9 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aH}}}\right) \left(\frac{1.01 \text{ kg aH}}{\text{kg aS}}\right) \left(1 + 1.87(0.012) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}\right) (55 - 20^\circ\text{K}) = 86806.17 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Vagonetas:

$$(1.3 \text{ kg/hr} + 2.16 \text{ kg ss/hr}) \left(\frac{0.47 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}\right) (55 - 20^\circ\text{K}) = 56.92 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

$$\begin{aligned} \text{calor total requerido} &= 99681.85 \text{ kJ/hr} \\ &= 27.69 \text{ kW-hr} \end{aligned}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{a) + b) + c) + d)}{\text{total}}$$

$$= \frac{692.39 + 35.69 + 10679.45 + 1067.94}{98844.16} = 12.62\%$$

En el caso de que el sólido a secar se coloque directamente sobre la banda por ejemplo en forma de placa de 0.25 cm de espesor a lo ancho de la banda, el área de flujo es mayor y por lo tanto, para mantener la velocidad de 5 m/seg el flujo de aire debe ser mayor:

$$vA = (5 \text{ m/seg})(0.42 \cdot (0.36 - 0.0025)) \text{ m}^2 (3600 \text{ seg/hr}) = 2702.7 \text{ m}^3/\text{hr}$$

en este caso el diámetro equivalente de flujo es:

$$d_e = 4 R_w = 4 \frac{A}{p} = 4 \frac{(0.36 \cdot 0.42) \text{ m}}{(0.36 + 0.42) 2 \text{ m}} = 0.3877 = 15.26''$$

y la sección circular de un tubo equivalente es:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0.3877)^2}{4} = 0.1180 \text{ m}^2$$

entonces el número de Reynolds sería:

$$Re = \frac{D v_f}{\mu} = \frac{(0.3877 \text{ m}) \left(\frac{(2702.7 \text{ m}^3/\text{hr})}{(0.1180 \text{ m}^2) (3600 \text{ seg/hr})} \right) (1.2 \text{ kg/m}^3)}{2 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m seg}} = 147999.5$$

y si consideramos nuevamente una rugosidad relativa de $\epsilon = 0.01$ para el sólido y 0.005 para la lámina galvanizada (ver fig A-23 de la ref. bibl. No.1), una rugosidad ponderada es:

$$\bar{\epsilon} = \left(\frac{(0.42) 1 + (0.3575) 2}{(0.42 + 0.3575) 2} \right) (0.005) + \left(\frac{(0.42) 1}{(0.42 + 0.3575) 2} \right) (0.01) = 0.0064$$

$$\frac{\epsilon}{d} = 0.00043$$

leyendo en la gráfica A-24 de la ref. bilb. No.1 para el \bar{e}/ρ y el número de Reynolds calculados, el factor de fricción f es 0.019 y la caída de presión se calcula mediante la ecuación $h = K v^4 / 2g$ para lo cual se consideran dos tramos rectangulares de 4 m:

$$K = f \frac{L}{D} = \frac{0.019(8 \text{ m})}{(0.3877)} = 0.392$$

y dos tramos en U

$$\sqrt{K} = 50 f_v = 2 * 50(0.0165) = 1.65$$

entonces

$$h_L = \frac{(1.65+0.392) \left(\frac{2702.7 \text{ m}^3/\text{hr}}{(0.1180 \text{ m}^2)(3600 \text{ seg/hr})} \right)^2}{2 * 9.81 \text{ m/seg}^2} = \begin{matrix} 4.21 \text{ m aire} \\ 4.21 \text{ mm agua} \end{matrix}$$

y la potencia requerida es:

$$HP = \frac{G \Delta P}{75 E'} = \frac{(2702.7 \text{ m}^3/\text{hr}) (4.21 \text{ mm de agua})}{(3600 \text{ seg/hr})}{75(0.5)} = 0.084$$

Tomando como base el ejemplo del caso en el que el sólido se coloca en vagonetas, podemos suponer solo para fijar la capacidad máxima del secador, que la capacidad de absorción de humedad del aire de secado es similar solo que afectada directamente por el aumento de flujo y la disminución en el área de contacto:

$$0.002 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg as}} \left(\frac{\text{FLUJO}}{2574.2 \text{ kg as}} \right) \left(\frac{\text{AREA}}{6} \right) = 0.000385 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg aire seco}}$$

Este cambio de humedad corresponde en la carta psicrométrica a una variación en la temperatura de solo 1°C, por lo que si queremos tener una eficiencia por lo menos igual a la del caso anterior de 12.5%, deberemos recircular algo de aire y la temperatura que debe tener la mezcla de aire recirculado y aire fresco es:

$$N = 0.125 = \frac{60 - 59}{60 - T}$$

despejando $T = 52^{\circ}\text{C}$.

y la relación de recirculación se calcula resolviendo simultáneamente estas dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} 59x + 20y &= 52 \\ x &= 1 - y \end{aligned}$$

en donde $y = 0.18$ porcentaje de aire fresco en la recirculación

$x = 0.82$ porcentaje de aire húmedo en la recirculación

De acuerdo a lo anterior, la cantidad de calor que se requiere proporcionar al aire alimentado para elevar su temperatura hasta la de entrada al túnel es:

$$\left(\frac{2702.7 \text{ m/hr}}{0.95 \text{ m}} \cdot \frac{1.01008 \text{ kg aH}}{\text{kg as}} \right) \left(\frac{1 + 1.87(0.01008) \text{ kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{K}} \right) (60 - 52^{\circ}\text{K}) = 22957.18 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

y el calor perdido a la salida del aire es:

$$\left(\frac{702.7 \text{ m/hr}(0.18)}{0.9 \text{ m}} \cdot \frac{1.010385 \text{ kg aH}}{\text{kg as}} \right) \left(\frac{1 + 1.87(0.010385) \text{ kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{K}} \right) (59 - 20^{\circ}\text{K}) = 21269.57 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

$$\text{Total} = 22957.18 + 21269.57 = 44226.75 \text{ kJ/hr}$$

$$= 12.29 \text{ kW-hr.}$$

Para verificar si la cantidad de calor calculada anteriormente es suficiente, debemos una vez mas suponer un proceso de secado que demande la mayor cantidad de calor dentro de nuestra capacidad delimitada.

Para lo anterior estableceremos la cantidad de sólido a manejar para una velocidad de la banda de 4 m/min:

$$(0.25 \times 38 \times 400 \text{ cm}^2) (1 \times 10 \text{ kg/cm}^2) \left(\frac{\text{túnel}}{4 \text{ m}} \right) \left(\frac{4 \text{ m}}{\text{min}} \right) (60 \text{ min/hr}) = 228 \text{ kg/hr}$$

entonces el cambio de humedad en el sólido a secar es de:

$$x_2 - x_1 = \frac{G_s (Y_2 - Y_1)}{w/t} = \frac{2973.2 (0.0004)}{228} = 0.0052 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg sH}}$$

También en este caso el calor que se le debe proporcionar al sistema es la suma del calor requerido para realizar las siguientes operaciones:

- a) Llevar la humedad contenida en el sólido hasta la temperatura de ebullición:

$$(1.19 \text{ kg agua/hr}) \left(\frac{4.1868 \text{ kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) (59 - 20^\circ\text{K}) = 194.3 \text{ kJ/hr}$$

- b) Llevar el material móvil del secador y el peso seco del sólido hasta la temperatura media del aire en el interior del secador.

material móvil:

$$\left(\frac{\text{túnel}}{1 \text{ min}} \right) \left(\frac{30 \text{ kgs}}{\text{túnel}} \right) \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \right) \left(\frac{0.47 \text{ kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) \left(\frac{60+59}{2} - 55^\circ\text{K} \right) = 3807 \text{ kJ/hr}$$

producto seco:

$$\left(228 \frac{\text{kg sH}}{\text{hr}} \right) \left(0.9948 \frac{\text{kg ss}}{\text{kg sH}} \right) \left(\frac{0.47 \text{ kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) \left(\frac{60+59}{2} - 20^\circ\text{K} \right) = 4210.8 \text{ kJ/hr}$$

- c) Evaporar el agua contenida en el sólido.

$$(1.19 \frac{\text{kg de agua}}{\text{hr}}) \left(\frac{539.84 \text{ kcal}}{\text{kg agua}} \right) \left(\frac{4.1868 \text{ kJ/kg}}{1 \text{ kcal/kg}} \right) = 2689.6 \text{ kJ/hr}$$

- d) Difusión de la humedad a través del sólido. (10% de la requerida para la evaporación).

$$(2689.6 \text{ kJ/hr}) 0.10 = 268.96 \text{ kJ/hr}$$

- e) Pérdidas de calor por radiación. (3% de las requerida para la evaporación).

$$(2689.6 \text{ kJ/hr}) 0.03 = 80.69 \text{ kJ/hr}$$

- f) Pérdidas de calor sensible con el aire de descarga del secador y con las vagonetas:

Aire:

$$\frac{(2702.7 \text{ m}^3/\text{hr})(0.18)}{(0.9 \text{ m}^3)(1.010385 \text{ kg aH})} \frac{\text{kg aH}}{\text{kg as}} \left(\frac{1+1.87(0.010385) \text{ kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) (59-20^\circ\text{K}) = 21269.57 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Sólido seco:

$$\frac{(228 \text{ kg sH})}{\text{hr}} (0.9948 \frac{\text{kg ss}}{\text{kg sH}}) (0.47 \text{ kJ}) (59-20^\circ\text{K}) = 4157.5 \text{ kJ/hr}$$

$$\begin{aligned} \text{calor total requerido} &= 36678.42 \text{ kJ/hr} \\ &= 10.188 \text{ kW-hr} \end{aligned}$$

En este ultimo caso, el rendimiento es:

$$\frac{194.3 + 4210.8 + 2689.6 + 268.96}{42226.75} = 17.44\%$$

C A P I T U L O

III

CONSTRUCCION Y OPERACION

El secador está constituido por cuatro sistemas:

- Sistema de circulación de aire
- Sistema de suministro de calor
- Sistema de transporte del material
- Sistema de instrumentación

Cada uno de estos sistemas puede trabajar independientemente, pero en el momento del secado se combina su operación de acuerdo a los requerimientos específicos del producto que se pretende secar.

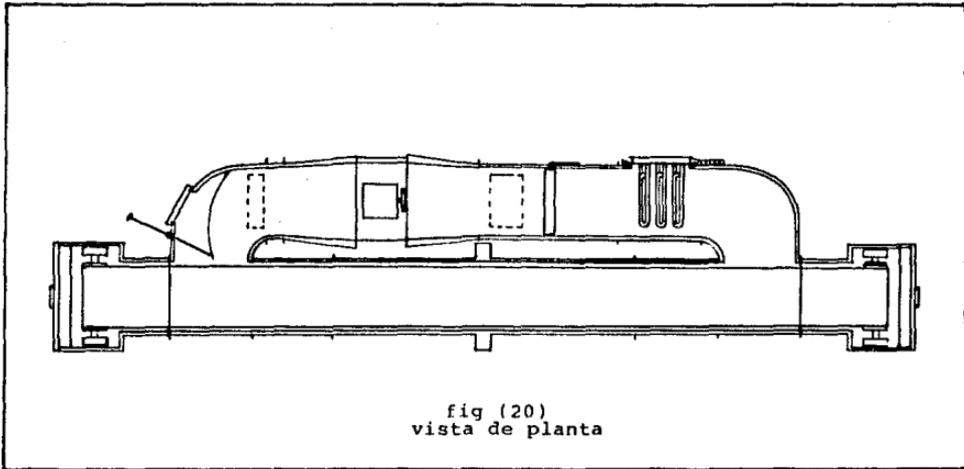
Antes de analizar cada sistema por separado, es necesario visualizar el equipo de manera global como se muestra en las figuras (20, 21, 22, 23 y 24). Posteriormente se analizarán las interrelaciones entre los cuatro sistemas y su funcionamiento en conjunto.

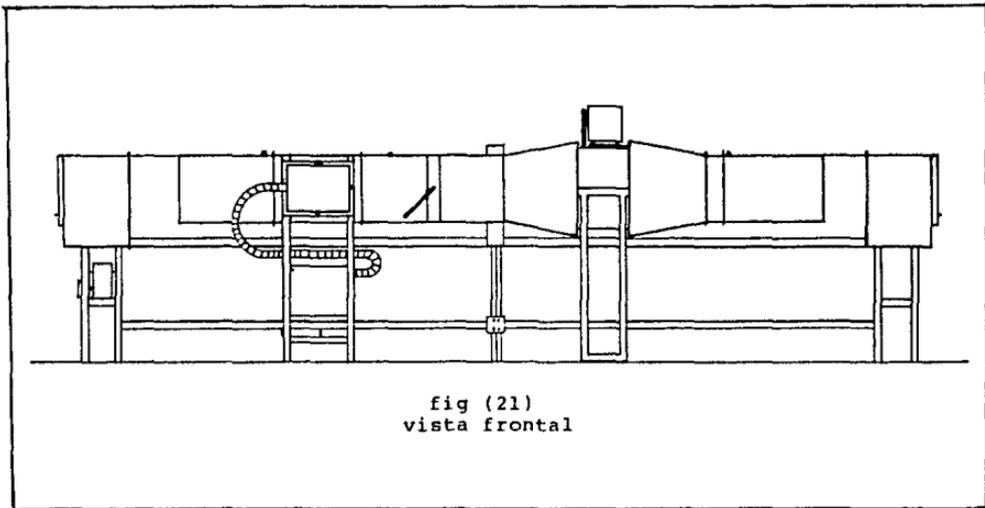
SISTEMA DE CIRCULACION DE AIRE.

La capacidad del ventilador fue seleccionada de tal manera de poder cumplir ampliamente con los requerimientos de flujo calculados en el capítulo anterior.

FLUJO (M3/Hr)	AP (mmH ₂ O)
2205	10.94
2702.7	4.21

En este caso, el ventilador seleccionado con un motor de 3/4 H.P. nos suministra el flujo requerido aún con una caída de -





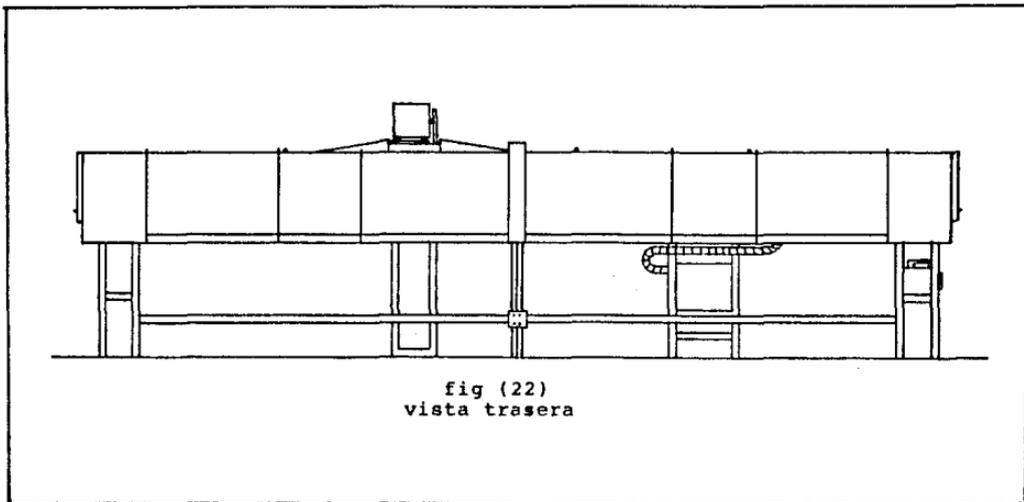
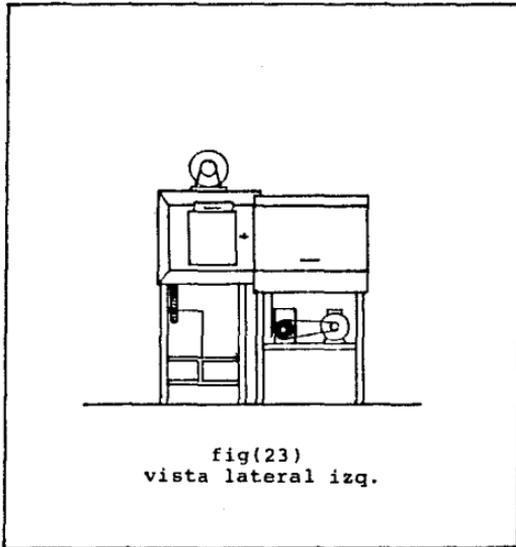
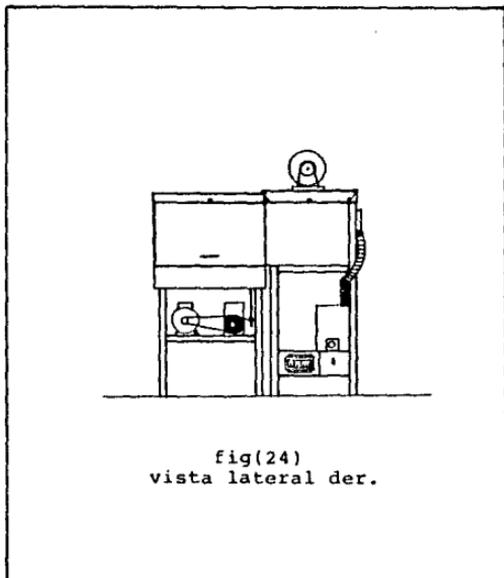


fig (22)
vista trasera



fig(23)
vista lateral izq.



fig(24)
vista lateral der.

presión de 17 mm de H₂O, según lo indica la curva típica de funcionamiento proporcionada por el fabricante. (Ver figura 25).

Adicionalmente se consideró el requisito de que el ventilador fuera accionado por transmisión de polea y banda, con motor exterior al flujo de aire, esto con objeto de no afectar al motor tanto por temperatura como por problemas de corrosión o de depósito de materiales.

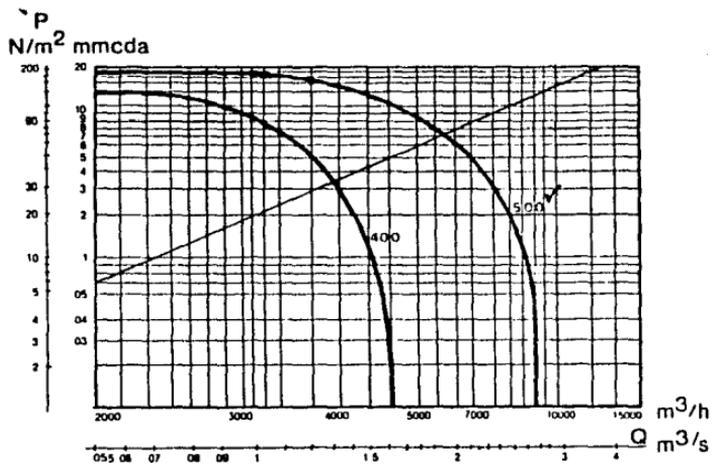
Además es indispensable que el equipo este diseñado mecánicamente y tenga los materiales y acabados adecuados para resistir altas temperaturas. En este caso el equipo consta de:

- Caja de Cojinetes de fabricación especial con rodamientos a bolas para alta temperatura.
- Polea en fundición de hierro.
- Hélices con palas de aluminio.
- Recubrimiento anticorrosivo y resistente a altas temperaturas (hasta 150° C).

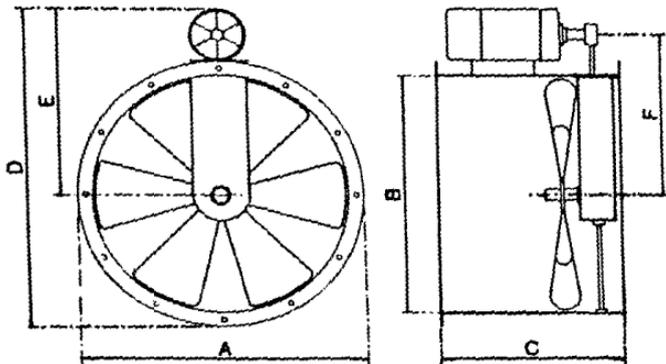
La configuración y las dimensiones del ventilador se muestran en la figura 26.

Otra característica importante del sistema de circulación del aire es que se puede dirigir el flujo del aire hacia una u otra dirección invirtiendo la rotación de las aspas del ventilador permitiendo hacer un secado del material a contracorriente o cocorriente según se desee. Para lo anterior se escogió un motor trifásico, que permite el cambio de rotación del motor con un simple cambio en la polaridad.

El aire es manejado a través de un ducto rectangular de lámina galvanizada y el flujo es controlado por medio de un mecanismo de aletas movido manualmente que se describe en la figura 27.



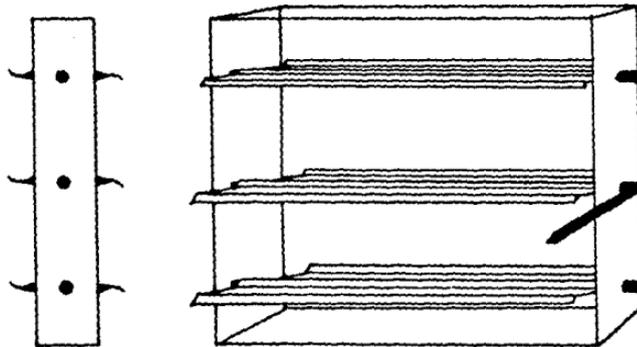
fig(25) Curva típica de funcionamiento del ventilador.



	A	B	C	D	E	F
Dimensiones mm	565	500	310	730	480	400

fig(26) Configuración y dimensiones del ventilador.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



fig(27) Mecanismo de control de flujo
por medio de aletas.

Este mecanismo puede al abrirse o cerrarse, aumentar o reducir el flujo del aire, contando además con una ventanilla de descarga situada entre el ventilador y las aletas que permite la salida controlada del exceso de aire, evitando la sobrecarga del motor del ventilador cuando se requiere un flujo de aire muy pequeño.

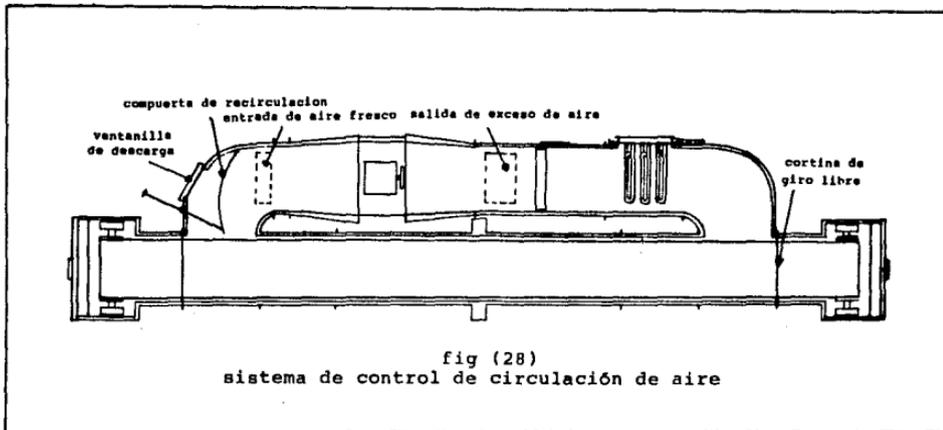
Para poder controlar la relación de aire recirculado, se instaló una compuerta en el codo por el que retorna el aire una vez que ha estado en contacto con el material húmedo (ver figura 28). Esta compuerta se puede mover en dirección horizontal para dirigir parte del flujo de aire hacia una ventanilla de descarga y parte de nuevo hacia el ventilador, recirculando la proporción de aire deseado que se mezclará más adelante con aire fresco alimentado por la ventanilla situada antes del ventilador.

Este sistema permite inclusive recircular todo el aire -- que maneja el ventilador o por el contrario no recircular nada, manejando 100% de alimentación de aire fresco, si así se requiere.

Adicionalmente, con la intención de disminuir las pérdidas de aire caliente a la salida del túnel junto con la descarga del material seco, se instaló una cortina de lámina reforzada en cada extremo del túnel (ver figura 28).

Estas cortinas giran libremente abriéndose al ser empujadas por las vagonetas que viajan sobre la banda transportadora, pero una vez que ha pasado la vagoneta, se cierran automáticamente impidiendo la salida de aire caliente que podría alcanzar a la persona que abre las puertas laterales (ver figura 29) para retirar la vagoneta con el material seco, evitando además las pérdidas de aire caliente.

Debido a que el cuerpo del ventilador es cilíndrico, éste está conectado al ducto por medio de una transformación circular



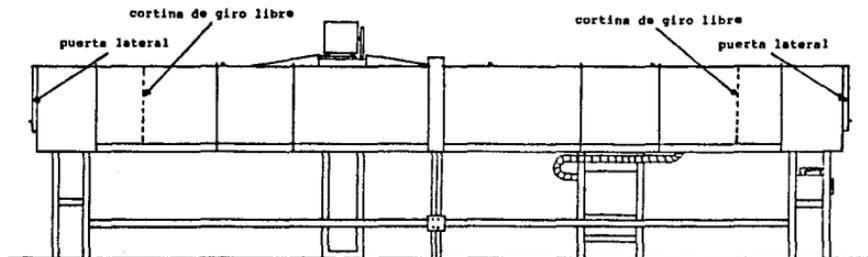


fig (29)
sistema de cortinas de giro libre
y puertas laterales.

-rectangular de lámina que reduce al mínimo la caída de presión en este punto.

SISTEMA DE SUMINISTRO DE CALOR.

La máxima cantidad de calor requerida por el secador se calculó en el capítulo anterior, obteniéndose los siguientes datos:

OPERACION	KW - Hr
Material en vagonetas	27.69
Material sobre la banda	10.188

De acuerdo a lo anterior, se determinó construir un sistema de suministro de calor a base de resistencias eléctricas con una capacidad máxima de 30 Kw-Hr.

El banco de resistencias consiste en un grupo de nueve resistencias tubulares con una potencia por elemento de 3333 Wátts (220 Volts), y 7/16" de diametro, montadas sobre una placa de acero inoxidable de 3/16" de espesor como se puede ver en la figura 30.

Se seleccionó este tipo de resistencias (tubulares) debido a que en conjunto, presenta las mayores ventajas para nuestro secador en particular. Si bien es cierto que las resistencias aletadas son más eficientes al presentar una mayor área para la transferencia de calor, también es cierto que representan una desventaja importante al requerir un mantenimiento mucho más frecuente por el depósito de materiales entre las aletas.

Este banco de resistencias tiene un arreglo conocido en el medio como "tipo deslizable", ya que está diseñado para poder penetrar a través de una perforación situada en una pared lateral del ducto. Así mismo, este puede ser retirado fácilmente para su mantenimiento ya que se fija al ducto por solo cuatro tornillos.

De la caja de conexiones que se muestra en la figura 30, - en donde se conectan las terminales de las resistencias, salen los cables que conducirán la corriente hasta el gabinete de control de temperatura. Estos cables están protegidos por un tubo-conduit flexible de 1" de diámetro.

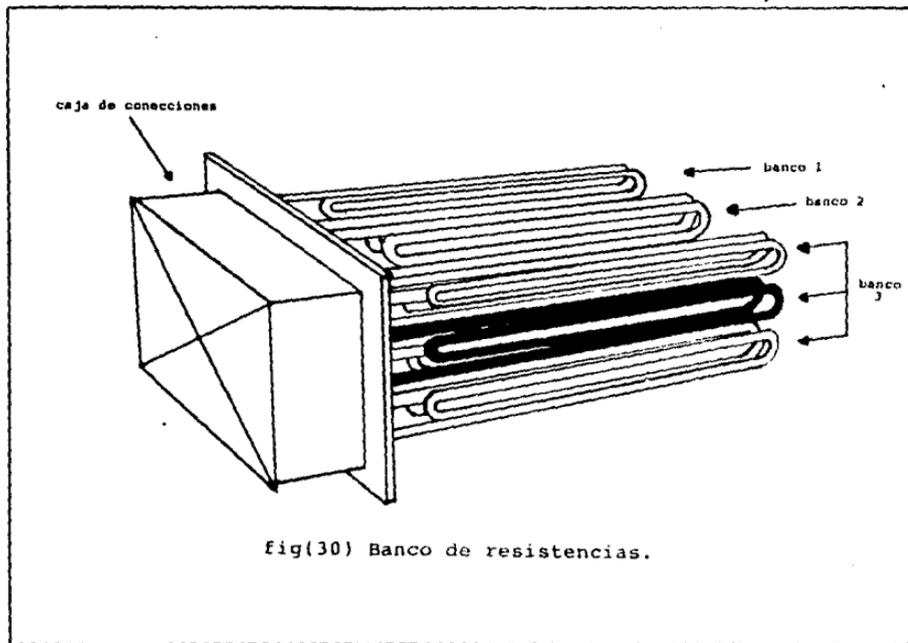
El gabinete de control de temperatura se muestra en la figura 31 y el diagrama eléctrico se muestra en la figura 32.

El equipo consta de los siguientes elementos:

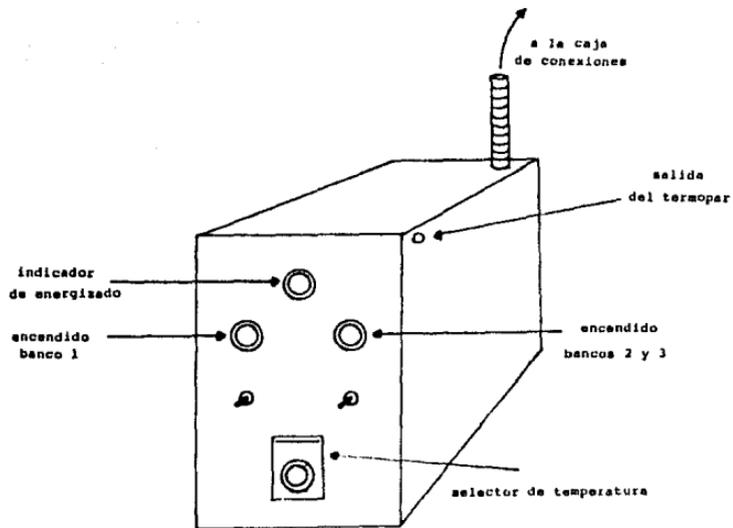
<u>CLAVE</u>	<u>E L E M E N T O</u>
F1	Fusible tipo botella (35A)
F2	Fusible tipo botella (35A)
F3	Fusible tipo botella (35A)
F4	Fusible tipo americano (6A)
L1	Lámpara roja de energizado
L2	Lámpara verde (encendido banco 1)
L3	Lámpara verde (encendido banco 2 y 3)
TC	Termostato TC-110° C H.
I1	Interruptor Arrow Hart
I2	Interruptor Arrow Hart
C1	Contacto Magnético 3 TB42
C2	Contacto Magnético 3 TB42
C3	Contacto Magnético 3 TB42

Al momento de energizar el equipo, la lámpara roja que se encuentra al frente del gabinete de control se enciende, indicando que el equipo se encuentra energizado y listo para funcionar.

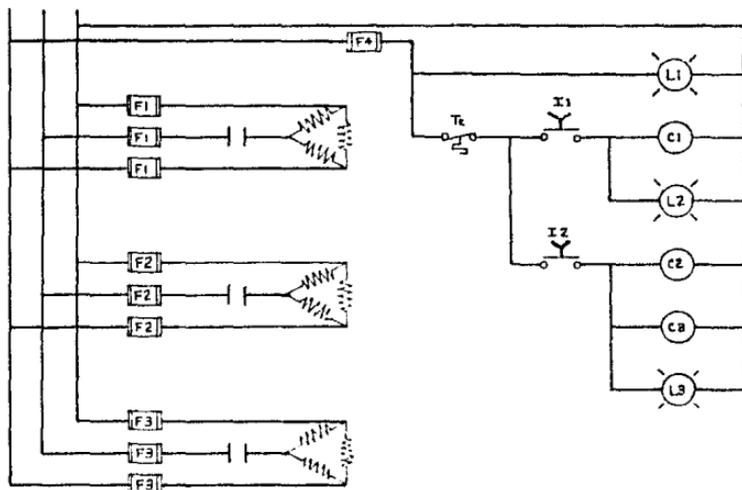
La temperatura de proceso a la que se desea operar, se selecciona girando la perilla que se encuentra abajo de la lámpara roja, esta temperatura es detectada por un termopar que está colocado en el interior del ducto, después del banco de resistencias y es controlada dentro de un rango de 2 a 3 °C por un controlador que cierra o abre los contactores magnéticos, conectan-



Fig(30) Banco de resistencias.



fig(31) Gabinete de control de temperatura.



fig(32) Diagrama eléctrico del sistema de control de temperatura.

do o desconectando los bancos de resistencias.

Las resistencias tubulares se encuentran divididas en tres grupos de tres resistencias cada uno, al accionar el interruptor I1 (izquierda), la lámpara verde L2 (izquierda) se encenderá indicando que el banco de resistencias 1 está conectado. Si se acciona el interruptor I1 en sentido contrario (hacia arriba), la lámpara verde L2 se apagará indicando que el banco 1 ha sido desconectado.

El interruptor I2 (derecha) y la lámpara verde L3 realiza el mismo trabajo que el I1 solo que con el banco de resistencias 2 y 3 simultáneamente, de manera que si se acciona el interruptor I1 y el I2 al mismo tiempo se encenderán las nueve resistencias tubulares a la vez.

Obviamente, los interruptores solamente seleccionan qué banco de resistencias (1, 2 o 3) se energiza y entra en operación cuando el termostato da la señal de que es necesario suministrar calor para mantener la temperatura previamente establecida por el usuario.

Por lo anterior, las lámparas verdes correspondientes a cada banco se encenderán solamente si la temperatura detectada por el termopar es menor a la temperatura establecida por medio de la perilla del termostato, la cual alcanza hasta 110° C.

El sistema cuenta con nueve fusibles tipo botella de 35A y un fusible tipo americano de 6A para protección de las resistencias y de los demás elementos del gabinete de control respectivamente. Esta protección es adicional a la proporcionada por el interruptor de cuchillas de 100 amperes que controla el suministro general de energía al secador.

Todas las partes del secador que están en contacto con el aire caliente se encuentran aisladas, así el ducto está formado -

por un sandwich de lámina galvanizada calibre 24/fibra de vidrio ⁸⁹ - (1")/lámina galvanizada calibre 24. Con lo cual aseguramos que -- las pérdidas por radiación al exterior sean mínimas y evitamos el peligro de quemaduras por parte de los usuarios.

Es importante mencionar también que las partes del secador que son de hierro están protegidas de la corrosión por un recubrimiento anticorrosivo a base de aluminio resistente hasta temperaturas de 130° C.

SISTEMA DE TRANSPORTE DEL MATERIAL

El transporte del material que se va a secar debe estar de acuerdo con las diferentes maneras en que se puede operar el secador, que son, como ya se mencionó anteriormente:

Continua, semicontinua e intermitente

Cocorriente y contracorriente

Material sobre la banda o sobre charolas/vagonetas

Para lograr lo anterior, el equipo cuenta con un transportador de banda metálica que se encuentra detallado en la figura 33.

Los elementos que constituyen el sistema son básicamente: la unidad motriz, la transmisión y la banda.

La unidad motriz, situada en un extremo del transportador, tiene una potencia de 2 HP, 220 Volts, a 3 fases, lo que nos permite cambiar la dirección en la que se mueve la banda fácilmente.

Este motor está conectado a un interruptor de cuchillas de 30 amperes que permite el arranque de manera independiente de los otros sistemas.

El motor está conectado por medio de un sistema de polea - escalonada y banda a un reductor de velocidad a base de engranes, - el cual hace girar por medio de una cadena el rodillo cabezal que-

mueve la banda transportadora. (Ver figura 23).

Ya que el motor seleccionado gira a 1650 RPM, el cálculo del sistema de engranes y reductor de velocidad se realizó de la siguiente manera:

Para un tiempo mínimo de residencia del material dentro del túnel de un minuto,

$$\text{Velocidad de la banda} = \frac{d'}{t} = \frac{5.16 \text{ m}}{1 \text{ min.}} = 5.16 \text{ m/min.}$$

Para una catarina de 10 cm. de diametro (sujeta al rodillo cabezal), las revoluciones requeridas son:

$$\text{RPM} = \frac{\text{vel}}{\pi D} = \frac{5.16 \text{ m/min.}}{(3.1416)(0.1 \text{ m})} = 16.42$$

Pero a la salida del reductor podemos utilizar la menor catarina disponible: 5 cm. de diametro, para la cual requeriremos solo 8.21 RPM y si a la entrada del reductor utilizamos una polea grande de 15 cms. de diametro, entonces se requiere un reductor con una relación de:

$$\frac{1650 \text{ RPM}}{(3)(8)} = 67$$

Es decir un reductor de una relación de 60 o 70 a 1.

Escogiendo uno de 60 a 1 las velocidades disponibles de la banda son las siguientes:

DIAMETRO DE POLEA DEL MOTOR (CMS.)	DIAMETRO DE LA POLEA DE ENTRADA AL REDUCTOR (CMS.)	VELOCIDAD DE LA BANDA TRANSPORTADORA (M/MIN.)
5.1	15.2	3.44
5.1	12.7	4.13
5.1	10.2	5.16
7.6	15.2	5.16
7.6	12.7	6.19
7.6	10.2	7.74

El motor está montado sobre correderas, de tal manera que se puede acercar o retirar del reductor para tensar o aflojar la banda, sin necesidad de utilizar varias bandas de distintas longitudes.

Un sistema más práctico podría ser un variador de velocidad del motor mediante variación de voltaje o un motor de corriente directa ya que tendríamos toda la gama de velocidades posibles, pero se consideró este equipo para un perfeccionamiento posterior por ser una inversión relativamente alta y que deberá evaluarse de acuerdo a la experiencia práctica con el manejo y aplicación del secador.

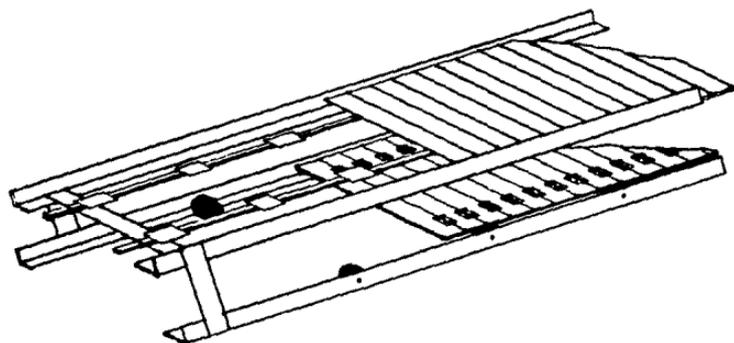
El tercer elemento de este sistema es la banda transportadora que está formada por 234 tabletas de lámina de hierro de 1,6 mm. de espesor y de 39,2 cms. X 4,6 cms.

Las tabletas se unen entre sí por medio de 3 bisagras soldadas a las tabletas y que permiten la articulación de la banda.

La banda está soportada por los rodillos cabezales que se encuentran colocados en los extremos del secador y cuyos ejes giran sobre chumaceras autoalineables que se pueden recorrer para poder mantener la banda bajo tensión. Lo anterior nos permite operar el equipo en ambos sentidos de giro sin peligro de que la banda se patine.

Adicionalmente, debido a que la distancia entre los rodillos cabezales es relativamente grande, la banda descansa al ser cargada, sobre dos ríoles que atraviesan el equipo longitudinalmente como se puede ver en la figura 33.

El regreso de la banda por la parte inferior se lleva a cabo sobre una serie de 10 rodillos de hule de cada lado. Estos rodillos tienen un buje de latón incertado en el centro, el cual gira sobre unos pernos fijos, permitiendo el regreso de la banda sin



fig(33) Detalle del transportador de banda metálica.

rozamiento alguno. (Ver figura 33).

Con el objeto de evitar que las orillas de la banda rocen con los ángulos que soportan los rieles sobre los que descanza la banda, se instalaron cuatro cilindros metálicos pequeños barrenados y colocados a un lado de la banda, de manera que giran libremente sobre pernos cuando la banda se llega a acercarse a alguna orilla momentáneamente.

El material, como se mencionó al inicio debe poderse transportar en forma de placa sobre la banda y también sobre charolas colocadas en vagonetas.

Las charolas son de lámina blanca estañada de 31 X 31 cms. con 1.5 cm. de altura.

Las charolas se construyeron de lámina blanca para evitar la corrosión, pero es recomendable forrar la superficie con papel aluminio cuando se vayan a secar alimentos, ya que el contacto directo de la lámina con el alimento puede contaminarlo resultando perjudicial para la salud si se ingiere.

Por otro lado, las vagonetas se construyeron en hierro con un recubrimiento anticorrosivo resistente a altas temperaturas como se describe en la figura 34.

SISTEMA DE INSTRUMENTACION.

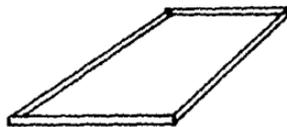
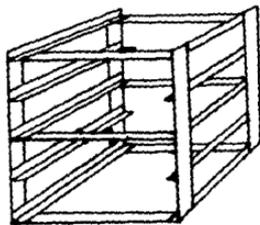
En este sistema se quisieron incluir a los elementos destinados a la medición de variables importantes para la operación del secador.

Estas variables son:

Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo

Caída de presión

Flujo de aire suministrado



fig(34) Vagoneta y charola.

La medición de la temperatura de bulbo seco se puede realizar por medio de tres termopares tipo T (cobre-constantano) que detectan la temperatura en los puntos 1, 2 y 3 o por medio de un termómetro, en el punto 4 (ver figura 35).

1.- Temperatura de la mezcla de aire recirculado y aire fresco antes de pasar por el banco de resistencias.

2.- Temperatura del aire al inicio del túnel.

3.- Temperatura del aire al final del túnel.

4.- Temperatura del aire al centro del túnel.

Los termopares se atornillan en las perforaciones roscadas de latón que se encuentran en los puntos antes mencionados (ver figura 36) y envían la señal a través de los alambres de extensión - hasta el pirómetro indicador que señala la temperatura al variar - la posición del puntero sobre la escala, como se puede apreciar en la figura 37.

Toda la energía que activa al medidor es generada por el termopar, no siendo necesarias baterías ni alguna otra fuente de energía.

El sistema de medición contiene compensación automática -- que corrige las variaciones de la temperatura ambiente, siendo necesario ajustar solamente al inicio la temperatura ambiente, por medio de un tornillo situado en el interior del pirómetro indicador fácilmente localizable.

Debido a que pirómetro únicamente puede indicar una temperatura a la vez, se cuenta con un selector de termopares provisto de un switch rotatorio hasta para 11 posiciones.

En nuestro caso solo utilizaremos 3 por el momento, como -

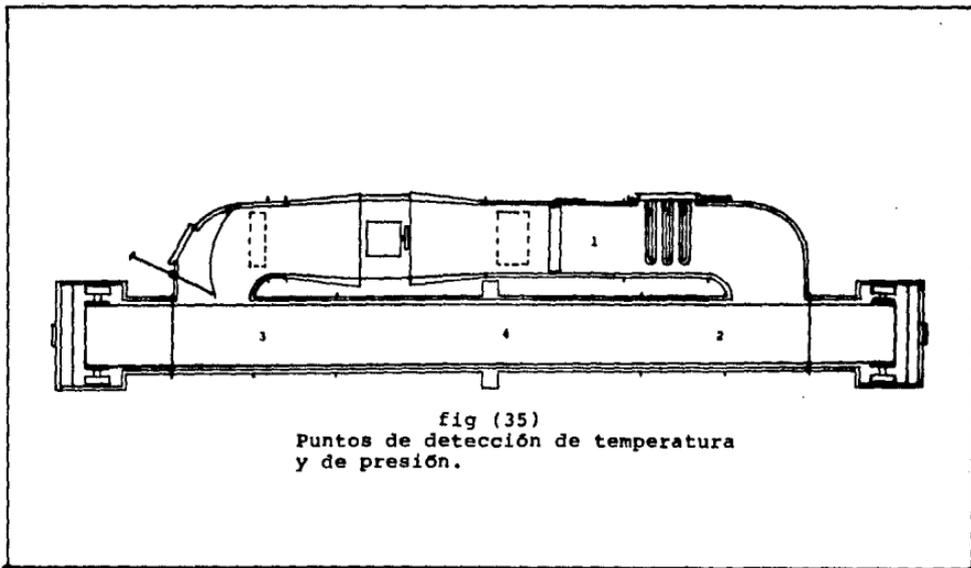


fig (35)
Puntos de detección de temperatura
y de presión.

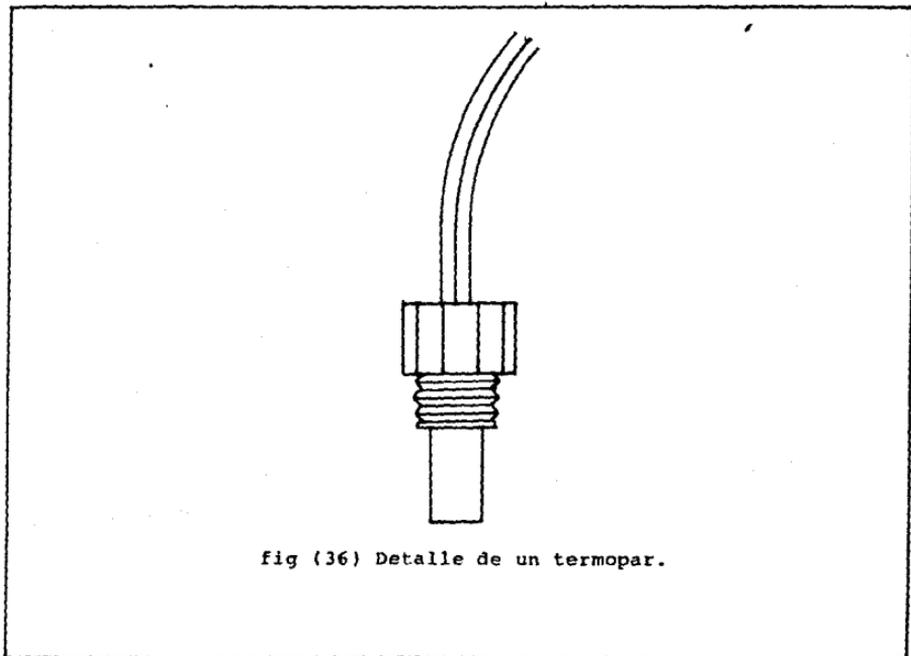
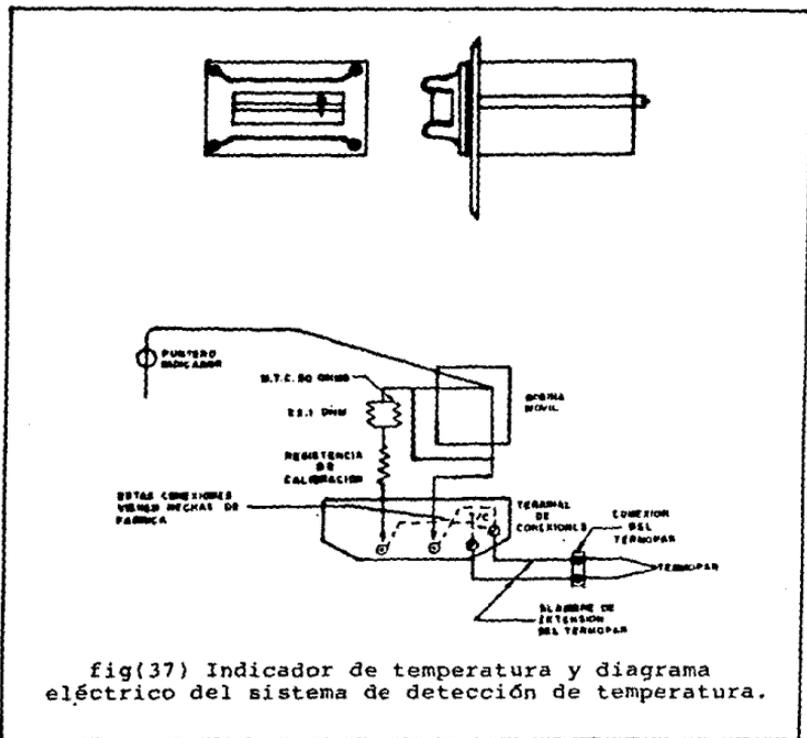


fig (36) Detalle de un termopar.



fig(37) Indicador de temperatura y diagrama eléctrico del sistema de detección de temperatura.

ya se indicó anteriormente, al girar el switch hacia la derecha -- hasta las posiciones 1, 2 o 3.

El selector se muestra en la figura 38, así como un diagrama del alambrado externo e interno.

La medición de las temperaturas de bulbo húmedo así como las presiones se deberán realizar utilizando las mismas perforaciones roscadas de latón, retirando los termopares respectivos.

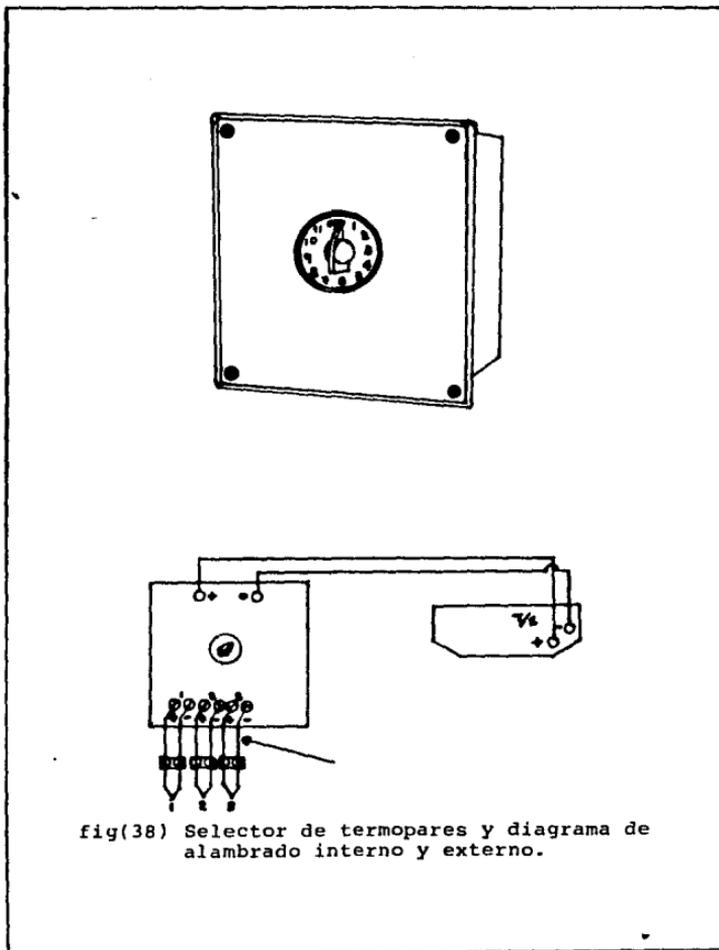
La detección de la temperatura de bulbo húmedo se puede -- llevar a cabo sujetando una gasa húmeda al termómetro y la presión se puede medir mediante el uso de un tubo pitot.

El flujo de aire suministrado, es decir, la mezcla de aire recirculado y aire fresco se controla por medio de un mecanismo de aletas descrito anteriormente en la figura 27.

La palanca que sirve para accionar dicho mecanismo, sirve también para indicar la posición en la que se encuentran las aletas, lo que está en relación directa con el flujo de aire que permite pasar.

De acuerdo a lo anterior se pudo obtener una tabla que relaciona la posición de la palanca accionadora contra el flujo de aire suministrado. (medido en la posición no. 4).

Esta tabla se encuentra en la página siguiente y la posición de las aletas de control está indicada sobre el secador con números romanos sobre los cuales debe apuntarse la palanca de control de las aletas para obtener el flujo de aire deseado.



fig(38) Selector de termopares y diagrama de alambrado interno y externo.

POSICION DE LAS ALETAS DE CONTROL *	100% RECIRCULACION		0% RECIRCULACION	
	PRESION MAX. (MMH ₂ O)	FLUJO (m3/Hr)	PRESION MAX. (MMH ₂ O)	FLUJO (m3/Hr)
(TOTALMENTE 0 ABIERTAS)	2	2624	1.0	1845
I	1.8	2482	0.9	1747
II	1.6	2335	0.8	1644
III	1.4	2183	0.7	1540
IV	1.2	2019	0.6	1421
V	1.0	1845	0.5	1296
VI	0.8	1644	0.4	1159
VII	0.6	1421	0.3	1002
VIII	0.4	1159	0.2	817
IX	0.2	817	0.1	577
(TOTALMENTE X CERRADAS)	-	--	-	--

* LA VENTANILLA DE DESCARGA SITUADA ENTRE EL VENTILADOR Y LAS -
ALETAS CONTROLADORAS SE MANTUVO TOTALMENTE CERRADA DURANTE ES
TAS MEDICIONES.

De la misma manera se obtuvo la siguiente tabla que-
relaciona la abertura de la ventanilla de descarga con el flujo
de aire suministrado (medido en la posición no. 4)*

ABERTURA DE LA VENTANILLA	100% RECIRCULACION		0% RECIRCULACION	
	PRESION MAX. (MMH ₂ O)	FLUJO (M3/Hr)	PRESION MAX. (MMH ₂ O)	FLUJO (M3/Hr)
(TOTALMENTE 0 CERRADA)	2	2624	1.0	1845
I	1.8	2482	0.9	1747
II	1.6	2335	0.8	1644
III	1.4	2183	0.7	1540
IV	1.3	2101	0.65	1481
(TOTALMENTE V ABIERTA)	1.2	2019	0.6	1421

* LAS ALETAS SE MANTUVIERON TOTALMENTE ABIERTAS AL LLEVAR A CA-
BO ESTAS MEDICIONES.

Estas tablas pueden servir como punto de partida para determinar la posición de las aletas y/o la abertura de la ventanilla de descarga para poder suministrar un flujo de aire determinado.

El hecho de que el flujo suministrado por el ventilador sea mayor al 100% de recirculación que al 0% de recirculación, se debe a que la toma de aire fresco que está colocada antes del ventilador (succión) es relativamente pequeña por razones de espacio, lo que ocasiona una gran caída de presión a la succión del aire fresco, resultando en una reducción del flujo suministrado. Por lo anterior es de esperarse que en futuras modificaciones al equipo, al ampliarse la toma de aire fresco, el flujo suministrado sea mayor al 0% de recirculación que al 100%.

El cálculo de las velocidades del aire a partir de las diferenciales de presiones (ΔP) máximas detectadas mediante el tubo pitot estático combinado, se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$V_o = C \sqrt{\frac{210.8865 P}{\rho_o}} \quad (0.3048)$$

En donde V_o = Velocidad puntual en m/seg.

P = Diferencial entre la presión de impacto y la presión estática en mmH_2O

C = Cte. adimensional (se tomó 1 como valor aproximado)

ρ_o = Densidad del fluido P_o y temp. local -
(Kg/m^3)

Como las presiones detectadas son las máximas, se puso un flujo con distribución normal de velocidades para poder determinar la velocidad promedio dentro del túnel por medio de la gráfica mostrada en la figura 41. Posteriormente se obtiene el flujo al multiplicar esta velocidad por el área libre - - - (0.1512 m^2). (Ver tabla 39).

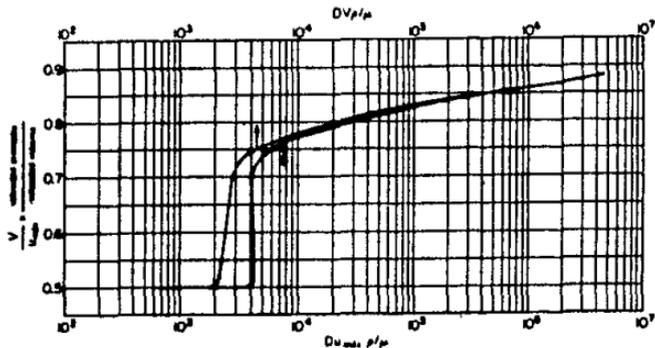


Fig. 41.- Índice de velocidad en función del No. de Reynolds para tuberías circulares lisas. (Basado en los datos de Rothfus, Archer, Klimas y y Sikchi. Am. Inst. Chem. Engrs. J. 3 208 (1957)).

Con el objeto de verificar la capacidad de calentamiento del secador, se operó el equipo a diferentes flujos de aire y se determinaron las temperaturas máximas alcanzadas sin recircular nada de aire y recirculando el 100%*.

FLUJO DE AIRE (m ³ /Hr)	0% RECIRCULACION TEMPERATURA MAXIMA** (°C)				100% RECIRCULACION TEMPERATURA MAXIMA (°C)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
2624					75	80	73	77
2487					76	81	74	78
2335					77	82	75	79
2183					79	84	77	81
2019					81	86	79	83
1845	24	40	40	40	83	88	81	85
1747	24	41	41	41				
1644	24	42	41	41	85	90	83	87
1540	24	43	41	42				
1421	24	45	43	44	88	94	86	91
1296	24	47	44	45				
1159	24	49	45	47	93	98	90	95
1002	24	53	48	51				
817	24	59	52	56	106	112	103	109
577	24	73	66	69				

* LA OPERACION SE REALIZO UNICAMENTE CON EL BANCO 1 FUNCIONANDO YA QUE EN ESE MOMENTO NO SE DISPONIA DE LA CAPACIDAD NECESARIA EN LA INSTALACION ELECTRICA PARA LA OPERACION DE DOS O TRES BANCOS SIMULTANEAMENTE. (TAMB= 24°C)

** SE MUESTRAN TEMPERATURAS PROMEDIO DE MEDICIONES EFECTUADAS EN NUEVE PUNTOS DISTRIBUIDOS EN LA SECCION TRANSVERSAL DEL TUNEL.

La eficiencia de la transferencia de calor de parte de las resistencias al aire se evaluó para el caso del manejo -

de aire sin recirculación por medio de la ecuación de $Q = mC_p\Delta T$
y considerando $N = \frac{mC_p\Delta T}{10 \text{ KW-Hr}}$

Los 10 KW-Hr es la energía proporcionada por un banco de 3 resistencias tubulares de 3.33 ... KW-Hr cada uno (ver tabla 40).

TABLA 39

FLUJO DE AIRE SUMINISTRADO

PRESION MAX. (mm de agua)	VELOCIDAD MAX. (m/seg.)	$\frac{D_{max} \rho}{\mu} \times 10^5$	V/u_{max}	V (m/seg)	FLUJO (m ³ /Hr)
2.0	5.74	1.32	0.839	4.82	2623.6
1.8	5.44	1.25	0.838	4.56	2482.1
1.6	5.13	1.18	0.837	4.29	2335.1
1.4	4.80	1.10	0.836	4.01	2182.7
1.2	4.44	1.02	0.835	3.71	2019.4
1.0	4.06	0.94	0.834	3.39	1845.2
0.9	3.85	0.88	0.833	3.21	1747.3
0.8	3.63	0.83	0.832	3.02	1643.8
0.7	3.40	0.78	0.831	2.83	1540.4
0.6	3.14	0.72	0.830	2.61	1420.7
0.5	2.87	0.66	0.829	2.38	1295.5
0.4	2.57	0.57	0.828	2.13	1159.4
0.3	2.22	0.51	0.827	1.84	1001.5
0.2	1.81	0.41	0.826	1.50	816.5
0.1	1.28	0.29	0.825	1.06	577.0

TABLA 40 EFICIENCIA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE LAS RESISTENCIAS HACIA EL AIRE
(% RECIRCULACION)

FLUJO DE AIRE (m ³ /Hr)	FLUJO DE AIRE (kg aire seco/Hr)	T (°C)	CALOR TRANSFERIDO (Kw-Hr)	EFICIENCIA (%)
1845	2175	16	9.84	98.4
1747	2059	17	9.90	99.0
1644	1938	18	9.87	98.7
1540	1815	19	9.75	97.5
1421	1675	21	9.95	99.5
1296	1528	23	9.94	99.4
1159	1366	25	9.66	96.6
1002	1181	29	9.69	96.9
817	963	35	9.54	95.4
577	680	49	9.43	94.3

COSTO DEL EQUIPO

CANTIDAD	EQUIPO	COSTO (M.N.)	COSTO (DOLARES E.E.U.U.) (1)	FECHA DE ADQUISICION (1987)
1	Extractor Turboaxial	331,200	317.75	04-III
1	Transportador Articulado de Banda Metálica	700,421	550.15	01-II
1	Reductor de Velocidad	424,202	331.19	01-VI
1	Banco de Resistencias con Control de Temperatura	825,527	629.21	18-VI
1	Motor Eléctrico Trifásico (2HP)	246,169	179.26	14-VII
1	Ducto Aislado de Lámina Galvanizada	1'398,926	978.27	04-VIII
1	Interruptor de Cuchillas (100 A)	46,853	32.63	08-VIII
2	Interruptores de Cuchillas (30 A)	19,436	13.69	01-VIII
1	Cable Eléctrico (No. 2) (100 Mts.)	444,000	285.16	24-IX
23	Tramos de Ducto Rectangular (6 X 6 X 152 cm.)	345,000	221.58	24-IX
5	Codos 90° para Ducto Rectan gular	15,000	9.63	24-IX
1	Embobinado de Motor Eléctri co (3/4 HP)	58,650	25.78	24-XII

CANTIDAD	E Q U I P O	COSTO (M.N.)	COSTO (DOLARES E.E.U.U.) (1)	FECHA DE ADQUISICION (1987)
20	Metros de Alambre de Extensión para Termopares Tipo-(T) No. 16	40,619	26.39	17-IX
1	Banda de Hule Tipo A 27	3,324	2.03	27-X
1	Polea de Aluminio (3")	3,289	2.16	12-IX
3	Vagonetas (31 X 31 X 29 cm)	69,000	28.75	19-XI
15	Charolas de Lámina Blanca (30 X 30 cm)	69,000	28.75	19-XI
3	Coples de Bronce	8,358	5.19	17-X
1	Polea de Aluminio Escalonada (4", 5" y 6")	13,179	8.71	07-IX
1	Polea de Aluminio (2")	4,235	2.80	07-IX
1	Otros (1/2 litro pintura, brocha 1", lija # 600, 1/2 litro solvente)	9,238	5.53	06-XI
1	Otros (casetas de hule, tubo de latón, tornillos, broca y tuercas)	10,839	7.64	01-VIII
T O T A L (2)		5'086,465	3,692.00	

(1) Considerando el tipo de cambio libre a la venta (Casa de Cambio)

(2) Debe considerarse adicionalmente el equipo con el que ya se contaba a saber: 1 Indicador de Temperatura, 1 Selector de Termopares y 3 Termopares Tipo "T" con un costo aproximado de 120 Dólares

C O N C L U S I O N E S

Al analizar los resultados mostrados en las tablas del Capítulo III podemos decir que el equipo presenta las características que se requieren para su uso en la realización de -- prácticas de secado y de proyectos de investigación a nivel laboratorio.

Adicionalmente, el secador muestra cualidades sobresalientes para su aplicación de entre las cuales destacan -- las siguientes:

- Gran versatilidad para el manejo de muy diversos materiales en distintas condiciones de operación
- Amplio rango para el control de las variables -- del proceso (temperatura, flujo de aire, tiempo de residencia, etc.)
- Muy sencillo en su operación y de muy fácil mantenimiento
- Altamente seguro y resistente
- Gran capacidad de secado para ser un equipo de -- laboratorio
- Bajo costo de fabricación

Con respecto a lo anterior es importante señalar - que antes de iniciar esta tesis se cotizó un equipo similar con varios fabricantes nacionales obteniéndose precios de venta de 3 o 4 veces el costo total del secador construido. No se intento profundizar en la comparación del costo del equipo ya que se desconocen los márgenes de utilidad aplicados por los fabricantes.

Para finalizar, cabe señalar que este secador contiene principios de diseño que pueden ser aplicados en la construcción de equipos similares a nivel industrial en donde las - cualidades antes mencionadas pueden representar una reducción - substancial de costos de operación o en un momento dado, la posibilidad de penetrar en nuevos mercados sin la necesidad de hacer una gran inversión inicial.

Abreviaturas utilizadas y unidades correspondientes.

ABREVIATURA	UNIDADES	
A	m^3	
A	m^2	(periodo secado cte.)
a	m^2/m^3	
c	$KJ/Kg^{\circ}C$	(C_g, C_v, C_H, C_s, C_A)
C	-	(cte, adimensional)
D	m^2/seg	
D	m	
d	m	
de	m	
d'	m	
E	-	
E'	-	
f	-	
F	mmagua/mtúnel/vel3m/seg	(empírico)
G	Kg gas húmedo/ m^2 seg	
Gs	Kg gas seco/ m^2 seg	
g	$9.81 m/seg^2$	
hc	$W/m^2^{\circ}C$	
hr	$W/m^2^{\circ}C$	(coef. de transf. de calor por evaporación desde superficie)
he	$W/m^2^{\circ}C$	
H's	KJ/Kg sólido seco	
Htog	m	
J	-	
J	-	
ky	Kg/m^2 seg (Kg agua/Kg aire seco)	
km	$W/m^2^{\circ}C$	
ks	$W/m^2^{\circ}C$	
L	m	(longitud del túnel)
m	Kg/hr	
N	-	
Ntg	-	
Ntog	-	
P	N/m^2	(mm agua en las ecs. señaladas)
p	N/m^2	
Pr	-	
q	W/m^2	(q_c, q_v, q_h, q_g)
Q	KJ	
Q'	KJ	
R	Kg agua evaporada/ m^2 seg	
Rf	"	(vel. secado decreciente)
Rc	"	(vel. secado cte.)
Re	-	
S	m^2/m^3	
Sc	-	
t	seg	
tc	seg	(periodo vel secado cte)
T	$^{\circ}C$	($T_v, T_s, T_g, T_L, T_a, T_1, T_2, T_{sg}, T_{sf}, T'_g, T'_m$) K en ecs. señaladas.
U	$W/m^2^{\circ}C$	

Uk	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	
v	m/seg	(velocidad del aire)
v'	m/seg	(velocidad media del aire en sección vacía)
Vo	m/seg	
w	Kg sólido húmedo	
W, Ws	Kg sólido seco	
x	Kg humedad/Kg sólido húmedo	
X	Kg humedad/Kg sólido seco	
Xs	"	(humedad inicial)
Xc	"	(humedad crítica)
Xf	"	(humedad final)
X ^e	"	(humedad de equilibrio)
Y	Kg humedad/Kg gas de secado	(Yg, Ys, Yc, Ysw, Ysg, Yss)
Zm	m	
Zs	m	
ΔH_w	KJ/Kg sólido seco	
ϵ	-	
ρ	KJ/Kg	
ρ_0	Kg/m	
μ	Kg/m	
μ	Kg/m seg	

- 1.- CRANE CO. TECHNICAL PAPER NO. 410
Flow of fluids through valves,
fittings and pipe
1981, U.S.A.
- 2.- PERRY, R.H.: GREEN D.
Perry's Chemical engineer's Handbook
6a. Ed. Mc. Graw Hill, 1984
- 3.- LAPPE, WALTER C.: CLARCK, W.E.
Drying, Design and Costs
Chemical Engineering Report. Nov. 1965
- 4.- J. PISTONO RASCHIERI
Desecación de los Productos Vegetales
Ed. Reverte, S.A. San Magin 26, Barcelona 1965
- 5.- KEEY, R.B.
Drying, Principles and Practice
International Series of Monograph in Chemical Engineering.
New York, Pergamon 1972
- 6.- KNEULE FRIEDRICH 1900-
El secado. Tr. E. Chueca, Rev. Miguel Angel Montemayor
Bilbao, Urmo. 1966
- 7.- WILLIAMS GARDNER, AELWYN.
Industrial Drying -- Claveland
CRC. 1971
- 8.- MASTERS K.
Spay Drying Handbook
3a. Ed. London
G. Godwin 1979
- 9.- DITIMAN, F.W.
How to Classify a Drying Process
Chemical Engineering: 84(2): 1977
- 10.- GONZALEZ ANGEL M: VALIENTE ANTONIO B.
Manual de Laboratorio de Transferencia de Masa. Fac. Química.
U.N.A.M. 1980
- 11.- KERN D.Q.
Process Heat Transfer
New York, Mc. Graw Hill, 1950
- 12.- TREYBAL ROBERT E.
Operaciones de Transferencia de Masa.
2a. Ed., Mc. Graw Hill 1985.
- 13.- SLOAN, C.E.
Drying Systems and Equipment
Chemical Engineering, 74(13). 1967

- 14.- MC. CABE AND SMITH.
Unit Operations of Chemical Engineering
Mc. Graw-Hill, Co. Inc. USA., 1966.
- 15.- POTTER F.
Drying Principles
Mc. Graw-Hill Co. Inc. USA., 1978.
- 16.- NONHEBEL G., MOSS A.A.H.
El secado de sólidos en la Industria Química.
Editorial Reverté S.A.
España, 1979.
- 17.- MARSHALL, W.R.
Encyclopedia of Chemical Technology.
Vol. 7 Mark, Mc Ketta, Othmer & Standen Eds.
Interscience, N.Y. 1965.
- 18.- SHERPHERD, C.B., C.HADDOCK, R.C. BREWER
Ind. Eng. Chemical, 30, 389, 1938.
- 19.- WILLIAMS-GARDNER, H.
Industrial Drying
L. Hill, Londres, 1971
- 20.- SHERWOOD T.K.
Ind. Eng. Chemical, 21, 12, 976, 1929
22, 132, 1930.