

24/19



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES "CUAUTITLAN"

ANTEPROYECTO DE UN
SECADOR PARA
LABORATORIO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:
FERNANDO REYES LEYVA



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 está 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.	INTRODUCCION	1
II.	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
	a) <i>Teoría general del secado</i>	
	b) <i>Típos de secadores</i>	
	c) <i>Estudios experimentales del secado</i>	
III.	SELECCION DEL TIPO DE SECADOR IDONEO	52
IV.	DISEÑO	55
V.	ESTIMACION DE COSTOS	89
VI.	CONCLUSIONES	91
VII.	BIBLIOGRAFIA	93

I.- INTRODUCCION.

El secado es una operación básica en el tratamiento de productos tan importantes como los alimentos y las medicinas, por las razones que a continuación se mencionan:

- para reducir el peso de la carga en envíos a largas distancias.
- para recobrar solventes valiosos que se hallan agregado con anterioridad al producto.
- para facilitar el manejo de los materiales en equipos subsecuentes del proceso.
- para alcanzar la velocidad óptima en otros puntos del proceso o reducir el consumo de combustibles, reactivos, energía, etc., u otros costos de operación en esos pasos.
- para asegurar el cuidado de la calidad del producto durante la carga o almacenaje.
- para asegurar el acondicionamiento del material para nuevos procesos, como lo son: la separación electrostática, tamizado, etc., -- que requieren material seco para un proceso de máxima eficiencia.
- para incrementar la atracción del mercado y el valor de venta del producto.

Generalmente, el tiempo de secado requerido por el producto es largo, sobre todo, para lograr las condiciones óptimas de manejo y conservación. El control de la operación se obtiene conociendo las variables que influyen en ella y los rangos en los que se requiere de dicho control. Para lograr lo último y mejorar los tiempos de secado, es necesario realizar estudios en un equipo diseñado específicamente para eso; por lo que debe permitir el control de, al menos, -- las variables más comunes y la observación de la evolución de toda -- operación.

El secado implica un intercambio de masa y energía entre el material a secar y el fluido secante, por lo que se deben conocer el estado y las condiciones de ambos participantes, así como la naturaleza de la fuente calorífica empleada. Lo anterior, aunado a la duración de las fases finales de secado, determinan que para lograr la caracterización completa de la operación, se requiere de un secador escala laboratorio. De los varios tipos de secadores existentes el más usual, dadas sus características, es el túnel de secado. Dicho túnel reproduce y controla las variables que influyen en una transferencia de -

masa y energía; por lo que se pueden realizar con él, prácticas que conllevan estos procesos, dado que se puede equipar con lo necesario para controlar y registrar las variaciones de los parámetros que nos permitan analizar y concluir, respecto a la conducta de los mismos, con una mayor facilidad.

Por lo expuesto, este trabajo se enfoca hacia la determinación del secador más adecuado para realizar prácticas e investigación sobre el secado en los laboratorios de Ingeniería Química de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

II.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

a) Teoría general del secado.

Entendemos por secado el procedimiento adoptado para eliminar el líquido de un producto por evaporación o vaporización, con ayuda por lo general de calor. Existen básicamente tres tipos de secado: por conducción, por convección y por radiación.

En el secado por conducción, el producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de ellos.

En el secado por convección, el calor necesario para la evaporación del líquido, se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del líquido o lo atraviesa. En el secado por radiación, el calor se transmite desde las superficies radiantes próximas.

A los anteriores procedimientos de secado, se agregan otros dos tipos, que se basan en la obtención de calor engendrado en el interior del producto, éstos son: el secado dieléctrico, que utiliza esencialmente el calor desarrollado por las corrientes de desplazamiento, -- producidas por un campo alterno de alta frecuencia; y el secado a -- vacío por pulsaciones, en el que se libera el calor almacenado en la materia, mediante descensos temporales de la presión, aportando la -- energía necesaria para una rápida evaporación.

A diferencia de otros problemas, el secado usa relaciones que son -- complicadas, porque en general, las condiciones físicas se modifican en el curso de la extracción de la humedad. Existen básicamente, -- tres fases en el secado: calentamiento, evaporación a velocidad cons -- tante y evaporación a velocidad decreciente. Usualmente, el período de calentamiento es corto en comparación con el tiempo total del secado, y, por lo tanto, es de menor importancia práctica. El período de velocidad constante de secado varía desde una fracción despreciable, hasta ser la mayor porción del tiempo del secado; este es el -- período más susceptible a consideraciones teóricas y puede, por lo -- tanto, establecerse la influencia de la mayoría de las variables que afectan el mecanismo de secado.

El período final del secado, corresponde a la zona de velocidad de -- creciente, el cual también puede variar, desde una pequeña porción -- de tiempo, hasta prácticamente el período completo; esto sucede -- cuando la mayor porción de la humedad se removió durante el período de velocidad constante de secado. Estos tres períodos se muestran en

las gráficas (A), (B) y (C).

De acuerdo a los principios físicos que rigen el fenómeno del secado examinaremos ahora, por separado, los diferentes períodos.

- Primer período: calentamiento.

Normalmente, el período de calentamiento es relativamente corto, --- aunque para materiales con un contenido de humedad del 2 al 1% ó menor, el período de calentamiento puede comprender una fracción significativa del tiempo total del secado; sin embargo, se pueden calcular los coeficientes de transferencia de calor y resultar muy aproximados a los desarrollados bajo el período de velocidad constante de secado.

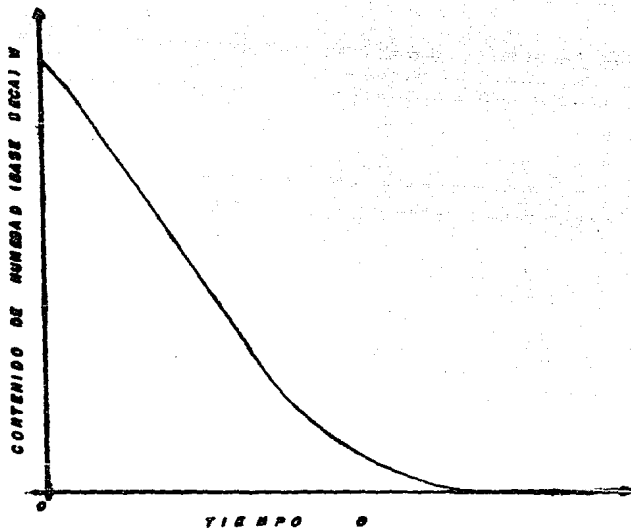
La mayoría de los materiales a secarse tienen un porcentaje de humedad superior al arriba mencionado.

- Segundo período: secado a velocidad constante.

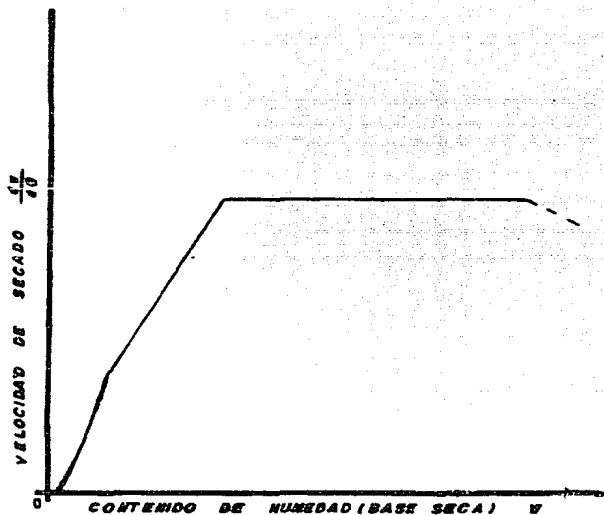
En este período el secado se caracteriza por la evaporación del agua libre que está sobre la superficie del sólido; siendo la velocidad de evaporación esencialmente independiente de la naturaleza del sólido, y la velocidad del secado es esencialmente equivalente a la velocidad de la evaporación para las mismas condiciones externas desde la superficie de una capa de agua sin ningún sólido presente. Por lo anterior, la velocidad de secado queda determinada por la rapidez -- con que se difunde el vapor de agua a través de la película de aire superficial, saliendo de ella y entrando a la masa principal de la corriente de aire. Una velocidad constante de evaporación sobre la superficie del sólido tiende a mantener dicha superficie a una temperatura constante, que en ausencia de otros efectos caloríficos, es casi la temperatura de bulbo húmedo, por lo que se le llama pseudo--temperatura de bulbo húmedo.

Sin embargo, cuando el calor llega a la superficie de evaporación -- por radiación o conducción, o por ambas maneras, además de por convección, la temperatura constante antes mencionada, estará en algún punto entre la temperatura del aire y la de bulbo húmedo; lo que producirá a su vez, una velocidad constante mayor de secado.

Cuando se transmite calor a un sólido húmedo por conducción, a través de superficies calientes, la transmisión por convección no es un factor importante, y entonces lo que interesa es la temperatura del

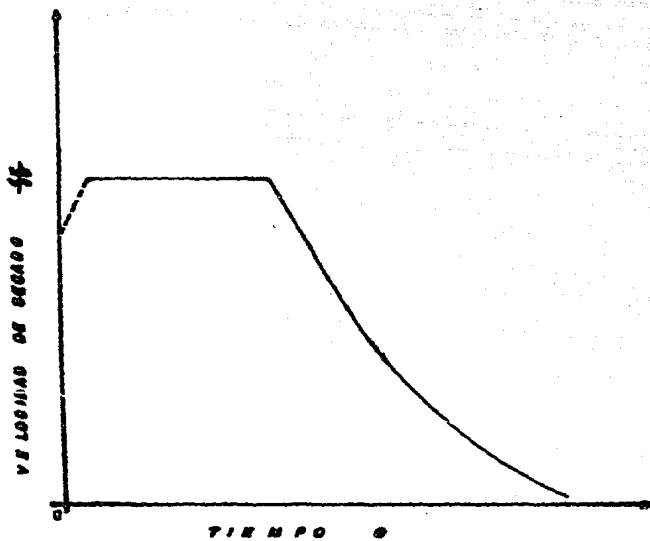


GRAFICA A
CONTENIDO DE HUMEDAD — TIEMPO



GRAFICA B

VELOCIDAD DE SECADO — CONTENIDO DE HUMEDAD



GRAFICA C
VELOCIDAD DE SECADO — TIEMPO

punto de ebullición antes de la de bulbo húmedo. En estos casos la -
 velocidad de secado será bastante mayor que en el secado por convec-
 ción, con aire a la misma temperatura.

La radiación es eficaz para la evaporación a velocidad constante, --
 porque eleva la temperatura superficial por encima de la temperatura
 de bulbo húmedo.

A continuación revisaremos las condiciones y ecuaciones aplicables -
 al caso en el que el calor para la evaporación en el período de velo-
 cidad constante es suministrado por gases calientes, por lo que se -
 establece un equilibrio dinámico entre el flujo de transmisión de ca-
 lor al material y la velocidad con que se elimina el vapor de la -
 superficie. Este equilibrio entre las velocidades o flujos de calenta-
 miento y de transferencia de masa se expresa como sigue:

$$\frac{dw}{d\theta} = \frac{h_t A \Delta t}{\lambda} = hg A \Delta p$$

Donde: A = área de transferencia de calor y de evaporación, m².

h_t = coeficiente de transferencia de calor,
 Kcal/h m² °C

λ = calor latente de evaporación a la temperatura
 t_s , Kcal/kg

hg = coeficiente de transferencia de masa, kg/h m² atm.

t = ($t_a - t_s$)

t_a = Temperatura del aire, °C

t_s = Temperatura de la superficie de evaporación, °C

Δp = ($p_s - p_a$)

p_s = presión de vapor del agua a t_s , atm.

p_a = presión parcial del vapor de agua en el aire, atm.

Si h_t es el coeficiente de transferencia del calor sólo por convec-
 ción, t_s es, en las condiciones de equilibrio, la temperatura de --
 bulbo húmedo y p_s es la presión del vapor a esa temperatura.

Si el calor se suministra también por radiación h_t es la suma - - -
 ($h_c - h_r$), siendo h_r el coeficiente de radiación y h_c el de convec-
 ción; en tanto que t_s es mayor que la temperatura de bulbo húmedo.

Se obtiene un resultado semejante cuando el calor llega a la super-

ficie de evaporación por convección y conducción. Cuando la superficie está a la temperatura de bulbo húmedo, el valor de Δp , en mm de Hg es casi la mitad de la presión de bulbo húmedo en °C.

Se evidencia de la ecuación anterior, que la magnitud de la velocidad constante, depende de tres factores.

- 1) El coeficiente de transferencia de calor o de transferencia de masa.
- 2) La superficie expuesta al medio empleado para el secado.
- 3) La diferencia entre las humedades o temperaturas de la corriente de aire y la superficie húmeda del sólido.

Respecto al primer factor, se debe considerar que los coeficientes de transferencia de masa dependen de la determinación de presiones parciales de agua en el aire por medio de la carta psicrométrica, - lo que nos lleva a grandes errores en el cálculo de diferencias de presión, resultantes de pequeños errores en las mediciones de temperaturas de superficie.

El error involucrado en los coeficientes de transferencia de calor es considerablemente menor, ya que dependen de datos que son evaluables experimentalmente sin tanto margen de error, como son las temperaturas de la masa de aire y de superficie (que equivale a la de bulbo húmedo en el caso de secado de planchas de material) y del -- área de la superficie húmeda. Por lo anterior, es preferible usar - los coeficientes de transferencia de calor a los de masa en todos - los cálculos de velocidad de secado.

En cuanto al segundo factor, la superficie es predeterminada para - cada experimento; y referente al tercer factor, se debe tener en -- cuenta que en el caso de la mezcla aire-agua puede considerarse, -- con bastante precisión, la temperatura superficial como equivalente a la de bulbo húmedo, dado que esta superficie no ha recibido aportación de calor ni por la radiación originada por el ambiente ni -- por la conducción a partir de las capas internas del líquido.

Debe recordarse que el contenido crítico de la humedad del material no es necesariamente constante, y que puede variar en función de la velocidad del secado y el grosor del material.

A mayor velocidad de secado y grosor del material, mayor es el gradiente de humedad dentro del material; de modo que las condiciones de humedad crítica se alcanzarán en la superficie con elevados con-

tenidos promedio de humedad.

Al obtener relaciones teóricas, se asume que la temperatura del material es o bien conocida, o se conocen los límites psicrométricos en ausencia de pérdidas por radiación. En la práctica, el material puede ser primero calentado arriba de la temperatura de evaporación; después, el secado tiene lugar a una velocidad apreciable.

El secado comienza entonces con una leve elevación de la temperatura a un contenido de humedad bajo; antes de lograr este punto, generalmente el secado se detiene, a menos que se desee un producto - excepcionalmente seco. En el caso anterior, la temperatura del material es elevada hasta el nivel deseado.

Por conveniencia, en cálculos de secado, la fuerza secante en la ecuación de velocidad es usualmente expresada como diferencia de -- humedades $H_3 - H_2$. A condiciones ordinarias de temperatura la presión parcial del vapor de agua es pequeña en comparación con la presión total y por ello es posible la aproximación que se muestra a -- continuación:

1) La ecuación que involucra transferencia de masa es:

$$W = K'g A_c (P_s - P_a) \quad (1)$$

donde W = velocidad de evaporación en lb/h

$K'g$ = coeficiente de transferencia de masa, basado en diferencia de presiones parciales, lb/hr ft² atm.

A_c = Area de la muestra expuesta a secado en el período de velocidad constante, ft².

P_s = Presión de vapor de líquido puro a temperatura de bulbo húmedo, atm.

P_a = Presión parcial del vapor en la corriente del -- gas secante, atm.

2) Por definición :

$$H = 18 P / 29 (1-p), \text{ a una atmósfera} \quad (2)$$

O aproximadamente

$$H = (18/29) p \quad (3)$$

Por consiguiente

$$W = (29/18) K_g A_c (H_s - H_a) \quad (4)$$

Donde:

H = Humedad absoluta del aire, lb agua/lb aire seco

H_s = Humedad de saturación a la temperatura de bulbo húmedo, lb vapor/lb gas seco

H_a = Humedad del vapor secante, lb vapor/lb gas seco

P = Presión de vapor del líquido puro, atm.

$$3) O: W = K'g A_c (H_s - H_a) \quad (5)$$

Donde:

$K'g$ = Coeficiente de transferencia de masa, basado en diferencia de humedades

lb/(h) (ft²) (lb vapor)/lb gas seco

4) Y:

$$A_c = \frac{W_1 - W_2}{K'g \theta_c (H_s - H_a)} \quad (6)$$

5) Donde:

W_1 = Peso inicial del agua libre almacenada, lb.

W_2 = Peso final del agua libre almacenada, lb.

θ_c = Tiempo de secado para el período de velocidad constante, hr.

Para calor transferido:

$$a) \text{ por convección: } \frac{q}{A} = \frac{\Delta t}{1/hc} = \frac{t_a - t_s}{1/hc} \quad (7)$$

$$q = hcA (t_a - t_s) \quad (8)$$

$$b) \text{ por conducción: } \frac{q}{A} = \frac{\Delta t}{x/k} = \frac{t_h - t_s}{x/k} \quad (9)$$

$$q = (k/x) A (t_h - t_s) \quad (10)$$

$$c) \text{ por radiación: } \frac{q}{A} = \frac{t_h - t_s}{1/\epsilon k_r} \quad (11)$$

$$q = \epsilon h_r A (t_r - t_s) \quad (12)$$

Donde:

q = Velocidad de flujo calorífico, Btu/h

h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección, Btu/h ft² °F/ft.

A = Area de secado, ft²

X = Distancia en dirección del flujo de calor por conducción, ft.

k = Conductividad térmica de un cuerpo sólido, - -
Btu/h ft² °F/ft

ϵ = Emisividad, adimensional

$$h_r = \frac{0.173 (t_r/100)^4 - (t_s/100)^4}{t_r - t_s} \quad (13)$$

t_a = Temperatura de bulbo seco de la corriente de -
gas secante, °F

t_s = Temperatura de la superficie húmeda, °F

t_h = Temperatura de una fuente de calor por conduc-
ción, °F.

t_r = Temperatura de una fuente de calor por radia-
ción, °F

El calor latente de la difusión de vapor en la corriente es λ_{sw} , --
que puede ser aproximadamente igual al calor sensible transferido a
la superficie como se muestra abajo:

$$\lambda w = \lambda_s k'g A_c (H_s - H_a) = h_c A_c (t_a - t_s) + \epsilon h_r A_c (t_r - t_s) + \left(\frac{k}{x}\right) A_c (t_h - t_s) \quad (14)$$

6:

$$\left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{\lambda_s}{C_s}\right) (H_s - H_a) = (t_a - t_s) + \epsilon (h_r/h_c) (t_r - t_s) + (k/xhc) (t_h - t_s) \quad (15)$$

Donde:

$$R = hc/k'g C_s \quad (16)$$

$$C_s = \text{Calor húmedo} \frac{\text{BTU}}{\text{Lb gas seco } ^\circ\text{F}}$$

Para mezclas aire-vapor de agua, las relaciones psicrométricas R -- pueden ser determinadas empíricamente como, sustancialmente, iguales a la unidad. En este caso, la relación $hc/k'g$ es igual a c_s , donde $c_s = 0.238 + 0.45 H_s$, y un valor promedio para esta relación es de -- aproximadamente 0.26. Para este sistema, en ausencia de efectos de -- radiación y conducción, la ecuación (15) puede ser reescrita como -- sigue:

$$\lambda_s (H_s - H_A) = C_s (t_a - t_s) = (hc/k'g) (t_a - t_s) \quad (17)$$

ya que puede ser expresada como:

$$\frac{\lambda_s (W_1 - W_2)}{\theta c h_c (t_a - t_s)} \quad (17a)$$

ya que en el equilibrio:

$$\lambda k'g (H_s - H_A) = h_c (t_a - t_s) \quad (18)$$

La ecuación (17) muestra la razón por la que las líneas de enfria--- miento adiabático y las líneas de temperatura constante de bulbo hú--- medo en la carta de humedad coinciden para todos los propósitos prác--- ticos. Simultáneamente, al establecer un valor apropiado de h_c , las ecuaciones (15) ó (13) pueden ser empleadas, entonces, para calcular aproximadamente H y la temperatura superficial, usando el método de cálculos de prueba y error o por métodos gráficos y el uso de la car ta de humedad.

Si los datos experimentales no son evaluables sobre la relación psi--- crométrica, para un sistema dado, el valor de R puede ser estimado -- de las siguientes relaciones:

$$R = \frac{hc}{k'g C_s} = \frac{(1/D_g M_A) + 21}{(C_s/km) + 21} \quad (19)$$

$$D_g = 0.00943 \frac{(460 + t_s)^{1/2}}{(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \quad (19a)$$

Donde:

D_g = Difusividad del gas, lb-mol/h ft

M_B = Peso molecular del vapor

M_A = Peso molecular del gas

k_m = Conductividad térmica de una mezcla de gas y vapor, Btu/h ft² F/ft

V_a = Volúmen molecular del gas

V_e = Volúmen molecular del vapor

Para muchos líquidos orgánicos, el valor de R es del rango de 1.5 a 2.0.

Si se hace una analogía entre la transferencia de calor y de masa en forma directa, entonces el coeficiente de película de transferencia de calor equivale al coeficiente de película para difusión. Ambos son una medida del grado en que una operación particular es inhibida, variando ambos inversamente con el grosor de la película de aire. Dicho grosor de la película de aire y, consecuentemente, la velocidad de secado, dependen de la dirección y velocidad de la corriente de aire sobre la superficie.

Para un flujo de aire paralelo a la superficie plana, se ha determinado que:

$$h_c = 0.0128 (V_p)^{0.8} \quad (20)$$

Donde:

ρ = Densidad del aire, lb/ft³

V = Velocidad del gas que fluye sobre la superficie o, para secado con circulación perpendicular de aire, velocidad superficial del gas, ft/h.

Para flujo de aire perpendicular a la superficie.

$$h_c = 0.37 (V_p)^{0.37} \quad (21)$$

En el caso de circulación de aire que atraviesa.

$$Re = \frac{\rho D_p V}{\mu} > 350 \quad (22)$$

$$h_c = 0.37 C_d (V_p)^{0.59} (1-e) / D_p^{0.41}$$

Donde:

D_p = diámetro promedio de partículas, ft.

e = porosidad, volumen de espacio hueco/volumen total de la muestra.

Para flujo de aire paralelo a la superficie vemos, de la ecuación (20), que la velocidad de secado es incrementada en un 75% al doblarse la velocidad del aire (9). Las ecuaciones (21) y (22) muestran que, en general, altas velocidades de secado son posibles cuando el aire es soplado perpendicularmente a la superficie o pasado a través de un lecho de sólidos subdivididos.

- Tercer período: velocidad decreciente de secado.

De discusiones cualitativas, es evidente que la velocidad de secado durante el período de velocidad decreciente puede ser una función compleja de muchos factores que pueden o no estar relacionados. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de secado, estas pueden estar fundamentadas en que los efectos combinados de los variados factores son funciones lineales del contenido de agua del material. Por consiguiente, la velocidad de remoción de humedad durante este período de secado, puede usualmente ser expresada, con razonable aproximación, como:

$$\frac{dw}{A_g d\theta_g} = -K (M - M_e) = -KF \quad (23)$$

Donde:

W = velocidad de evaporación, lb/h

A_g = área de la muestra expuesta a secado en el período de velocidad decreciente, ft²

K = R_c/f_c , una función del período de velocidad constante

R_c = velocidad del secado durante el período de velocidad constante, lb/h ft²

F_c = contenido de humedad libre en el punto crítico, -- lb/lb de muestra seca

M = contenido total de humedad, lb/lb muestra seca

M_e = contenido de humedad al equilibrio, lb/lb muestra seca

θ_f = tiempo de secado para el periodo de velocidad decreciente, h.

Esa porción de la curva, parte derecha y final de las gráficas A, B y C, representa el periodo de velocidad decreciente, que puede tener una curvatura cóncava hacia arriba o cóncava hacia abajo, pero que, en general, puede aproximarse a la relación de una línea recta. Bajo condiciones constantes de secado, la ecuación (23) puede, entonces, ser integrada como sigue:

$$\frac{dw}{A_f d f} = - K F \quad (25)$$

$$dw = W_d d F \quad (26)$$

$$\frac{- d F}{F} = \frac{(R_c A_f)}{(F_c W_d)} d \theta_f \quad (27)$$

$$A_f = \frac{F_c W_d}{\theta_f R_c} \int_{F_1}^{F_2} \frac{d F}{F} = \frac{F_c W_d}{\theta_f R_c} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (28)$$

F_1 = cantidad de humedad al inicio

F_2 = cantidad de humedad crítica

Donde:

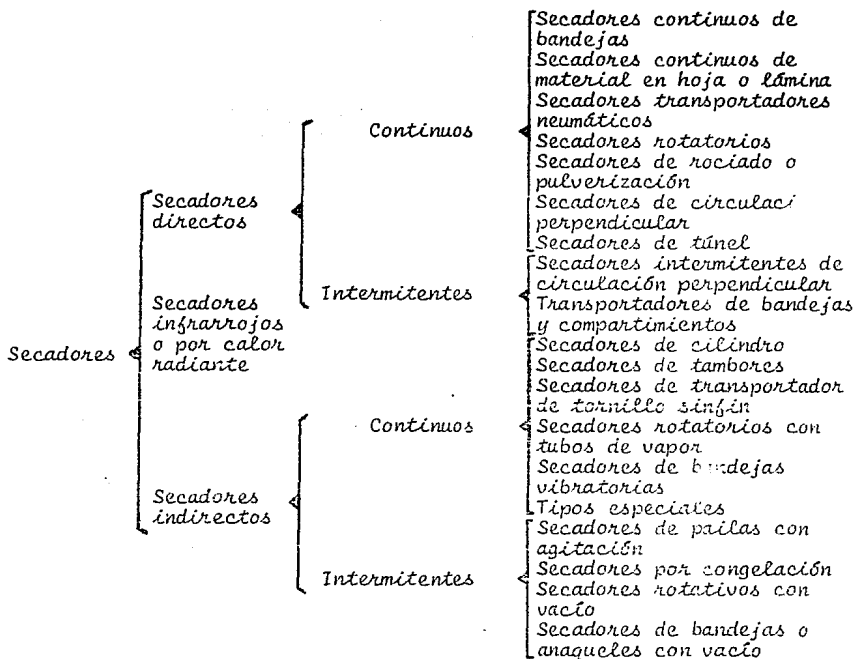
$$R_c = k' g (H_s - H_a) = \frac{h (t_a - t_s)}{\lambda_s} \quad (29)$$

Así:

$$A_f = \frac{F_c W_d \lambda_s}{\theta_f h c (t_a - t_s)} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (30)$$

b) Tipos de secadores.

A continuación se muestra una clasificación de los diferentes tipos de secadores existentes en las industrias, basada en la forma de -- transmisión de calor.



SECADORES DIRECTOS: En estos secadores, la transmisión de calor se -- realiza por contacto directo entre el sólido húmedo y los gases ca-- lientes.

Secadores continuos de bandejas: Utiliza como fuente térmica, gases - calientes.

Secadores continuos de material en hoja o lámina: Se pasa por el se-- cador una hoja continua.

Secadores transportadores neumáticos: En este tipo se realiza frecuen-- temente la molienda junto con el secado. El material se transporta a alta temperatura y los gases fluyen a gran velocidad, hasta un colec--

tor ciclón.

Secadores rotatorios: El material es transportado y esparcido dentro de un cilindro rotatorio por el que circulan los gases calientes.

Secadores de rociado o pulverización: Aquí el material debe poderse atomizar o pulverizar.

Secadores de circulación perpendicular: Aquí el material se sostiene con un tamiz y se hace pasar aire caliente a través del material.

Secadores de túnel: El material se coloca en carretillas que se pasan a través de un túnel en el que se ponen en contacto con gases calientes.

Secador intermitente de circulación perpendicular: Se trabaja en una similar al continuo.

Secador transportador de bandejas y compartimientos: El material se coloca sobre bandejas que pueden o no estar sobre carretillas móviles, el aire se sopla sobre o a lo largo del material de las bandejas.

SECADORES INDIRECTOS: Aquí el calor se transmite al sólido húmedo a través de las paredes que lo separan del medio calefactor.

Secadores de cilindros: Se utilizan con materiales en forma de láminas como el papel, los cilindros se calientan, generalmente, con vapor de agua.

Secadores de tambores: Estos se calientan con agua caliente.

Secadores con transportador de tornillo sinfín: En estos secadores es factible el funcionamiento al vacío y, por lo tanto, la recuperación del disolvente.

Secadores rotatorios de tubos de vapor: En estos secadores puede utilizarse indistintamente, vapor o agua caliente y un ligero vacío.

Secadores de bandejas vibratorias: Las bandejas son calentadas por vapor o agua caliente.

Secadores de tipos especiales: Consisten en bandas continuas de tejido que se mueven en estrecho contacto con una platina calentada por vapor.

Secadores de pailas con agitación: Pueden funcionar a la presión atmosférica o en vacío y manipular pequeñas producciones de casi cualquier sólido húmedo.

Secadores por congelación: El material se congela previamente al secado y luego se realiza este último a alto vacío.

Secadores rotatorios con vacío: El material se agita en una envolvente fija horizontal, siendo posible calentar el agitador y no siendo necesario siempre el vacío.

Secadores de bandejas o anaqueles con vacío: La calefacción se verifica en anaqueles calentados por contacto con vapor o agua caliente.

SECADORES INFRARROJOS O POR CALOR RADIANTE (secadores dieléctricos): El funcionamiento de estos secadores depende de la generación, transmisión y absorción de los rayos infrarrojos; colocándose el sólido como dieléctrico en un campo de alta frecuencia.

Ciertos calentadores rotatorios son combinación de los tipos directo e indirecto; por ejemplo: primero los gases calientan una envolvente interior y luego pasan entre ella y otra exterior, en contacto con el sólido húmedo.

c) Estudios experimentales de secado.

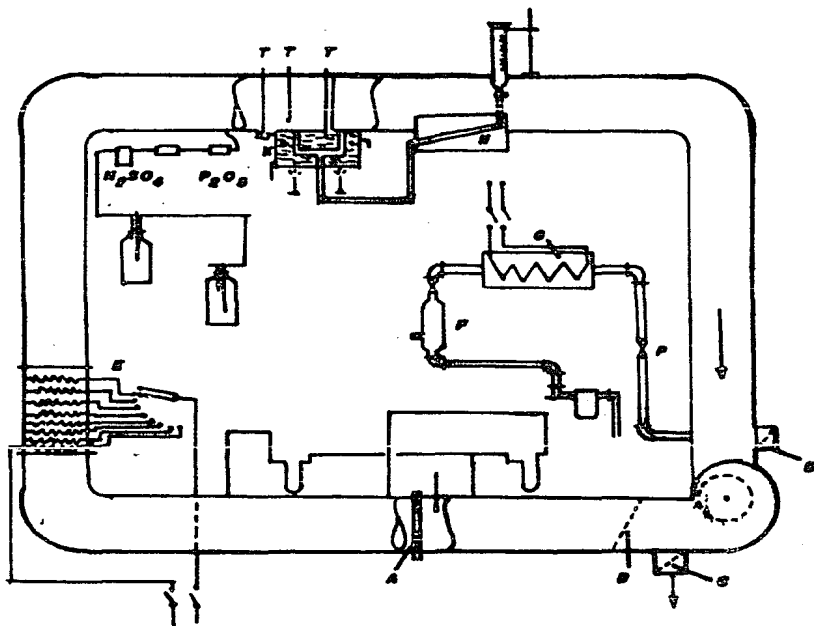
A continuación pasaremos a revisar cuatro trabajos en los que se tratan temas relacionados con el secado y que se realizaron en forma experimental.

1) Iniciaremos con el trabajo de Lurie y Michailoff (10), que trata de la evaporación de una capa superficial de agua.

El propósito de este estudio es el de analizar los diferentes factores que afectan la evaporación de agua superficial y cuyo conocimiento nos puede servir para el diseño, en procesos de enfriamiento de agua con aire, como son: los aparatos de aire acondicionado, lavadores, torres de enfriamiento, secadores, etc.

Para este trabajo se usó un túnel de viento, cuyo diagrama se muestra en la figura (1). Los experimentos se ejecutaron a una temperatura que iba de 40 a 225 °C, con una variación en la humedad de la corriente de aire de 10 a 250 g/kg de aire seco, y con una velocidad de aire de 1.0 a 7.5 m/seg. Una característica esencial de este trabajo, consiste en que el calor es alimentado únicamente, a través de la superficie de evaporación o bajo condiciones adiabáticas; esto es, la interacción del aire y la superficie de agua libre es estudiada separadamente.

El sistema de ventilación es cerrado con un cambiador parcial de aire, la velocidad se midió con un tubo Pitot y fue controlada por medio de los defletores. El aire se calentó mediante un ca-



- | | | | |
|----------|----------------------------|----------|---------------------------------------|
| A | PLACA DE ORIFICIO | S | SOBRECALENTADOR ELECTRICO |
| G | VALVULA DE MARIPOSA | P | VALVULA CONVENCIONAL |
| C | DEPLECTOR | E | VASIJA DE EVAPORACION |
| D | DEPLECTOR | H | NIVEL DE MANGUERA TRANSPARENTE |
| E | CALENTADOR | T | TERMOMETROS |
| F | SEPARADOR DE AGUA | | |

FIGURA I

SECADOR DE LURIE Y MICHAILOFF.

lentador eléctrico y el control de la temperatura se realizó exteriormente manejando un contactor de acuerdo con el número de secciones necesarias, una de las cuales es una resistencia adicional, que permite el mantenimiento de una temperatura determinada, en forma precisa. La saturación del aire circulante es realizada al proporcionarle una cantidad correspondiente de vapor sobrecalentado, admitida después del ventilador y previamente pasada a través de un separador de agua y un sobrecalentador eléctrico. Todo el sistema está aislado, por lo que es adiabático, y la vasija de agua está conectada con un tubo de vidrio inclinado, utilizado para registrar la variación del nivel del agua que se está evaporando en la vasija.

Solamente cuando se lograron condiciones estables en todo el sistema, se iniciaron las pruebas; para lograr esto, el sistema de ventilación se utiliza un tiempo considerable a una temperatura, humedad y velocidad de aire dadas. Tras la estabilización la temperatura del agua evaporada es la requerida, alcanzando la uniformidad a través del grosor completo después de un cierto período de tiempo (a veces muy considerable) bajo condiciones vedadas a toda evaporación adiabática. Esto es considerado para ser el principio del equilibrio térmico entre el aire y el agua evaporada.

Se realizaron más de doscientos experimentos, ochenta y ocho fueron sucesivos y comparados con los resultados obtenidos por otros investigadores. El tiempo de la prueba fue de dos a diez horas. De estos experimentos, aparte de las velocidades de evaporación numéricas, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- 1.- La temperatura de evaporación del agua bajo condiciones de equilibrio y en ausencia de pérdidas hacia el ambiente es cercana a la de bulbo húmedo.
- 2.- Usando una placa de 150 mm. de fondo, la variación de la temperatura a diferentes profundidades (bajo condiciones de equilibrio y con adición de agua a la misma temperatura) es despreciable.
3. La máxima velocidad de aire a la que las partículas finas de agua se salen de la vasija, es de ocho a nueve metros por segundo.

4.- Para todas las temperaturas estudiadas (40 a 225°C) la humedad relativa del aire, medida por un psicrómetro, es cercana a la medida gravimétricamente.

El efecto de la temperatura y grado de saturación del aire se pueden correlacionar mediante lo que se puede llamar "potencial de secado", esto es, una diferencia de presión entre la presión del vapor saturado a la temperatura de bulbo húmedo y la presión parcial del vapor a la temperatura y grado de saturación del aire en movimiento.

Como las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco se obtienen experimentalmente, la diferencia de presión se estima de la fórmula de Recknagel:

$$H - h = A b (t_c - t_m) \quad (31)$$

Donde:

H = presión de vapor saturado a la temperatura del bulbo húmedo, mm Hg.

h = presión parcial del vapor a la temperatura y grado de humedad del aire en movimiento, mm Hg.

A = coeficiente psicrométrico dependiente de la velocidad del aire e igual a $0.00001 \frac{65 + 6.15}{v}$

b = presión barométrica, mm Hg.

t_c = temperatura de bulbo seco, °C

t_m = temperatura de bulbo húmedo, °C

Graficando la velocidad de evaporación contra el potencial de secado (gráfica D) se puede apreciar que, dentro de los límites dados por los experimentos, la relación se puede considerar lineal, esto es:

$$\frac{W}{Z F} = C (H - h) \quad (32)$$

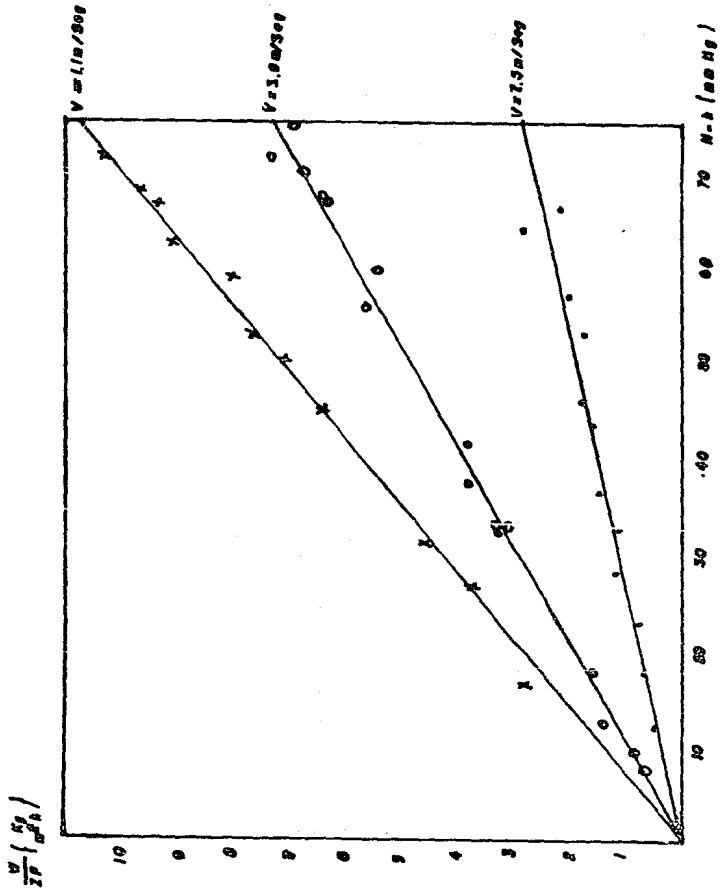
Donde:

W = peso del agua evaporada, g.

Z = tiempo, h.

F = superficie de evaporación, m²

C = velocidad de evaporación, g/h m² mm Hg.



GRAFICA D

VELOCIDAD DE EVAPORACION - RAZON DE POTENCIALES DE RESCALDO

y C es una función lineal de la velocidad del aire, cuya ecuación más probable es:

$$C = 22.0 + 16.8 v \left[\frac{g}{m^2 h mm Hg.} \right] \quad (33)$$

En que:

v = Velocidad promedio del aire en el ducto, m/seg.
(la verdadera velocidad del aire en la superficie de evaporación será diferente)

La velocidad de evaporación del agua libre superficial para un amplio rango de temperaturas del aire (40° a 225°C) y para velocidad del aire desde 1.0 hasta 7.5 m/seg., se puede considerar directamente proporcional al potencial de secado en una relación lineal con la velocidad del aire.

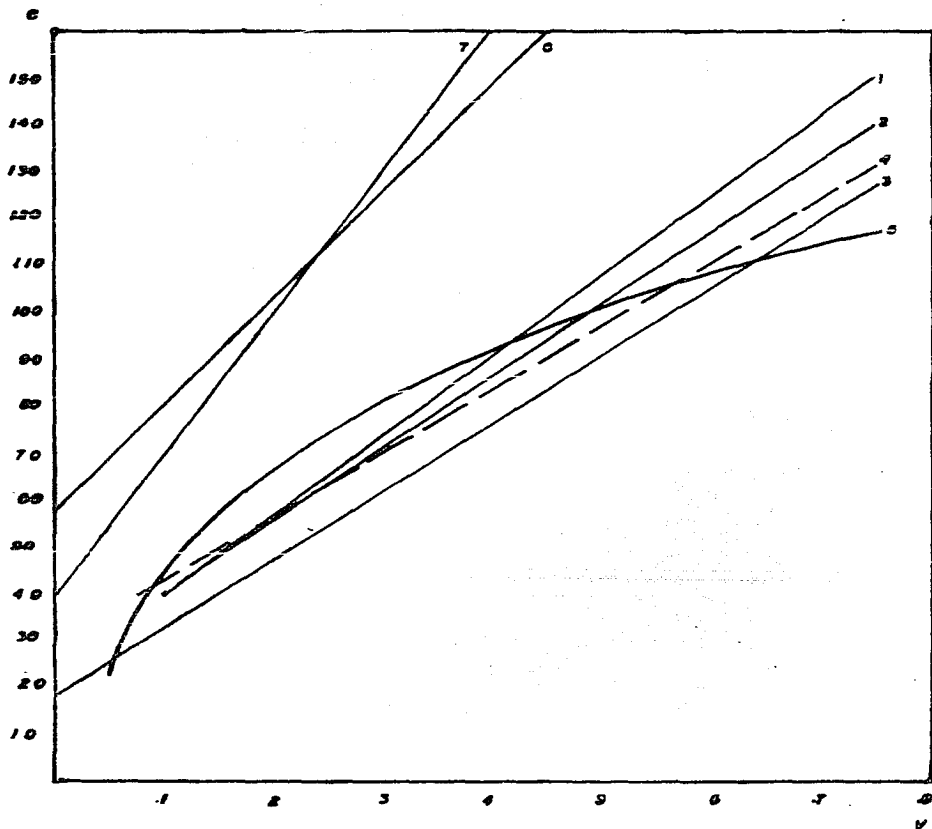
Para efectos de comparación, los autores calcularon los valores de C con los datos de otros investigadores usando la misma relación para la velocidad de evaporación:

$$\frac{W}{Z F} = C (H - h) \quad (34)$$

Los resultados de estos cálculos se muestran en la gráfica (D'); los valores de C obtenidos con los datos de Carrier por un lado y de Coffey y Horn por otro, para flujos de aire perpendiculares, se muestran también en dicha gráfica para compararlos.

En la mayor parte del trabajo experimental, la relación de la línea recta entre el coeficiente C y la velocidad del aire se confirman. Los valores C de los presentes experimentos difieren poco de los valores obtenidos a partir de los datos de otros experimentadores (2), (3), (5), (7) y (15), sin influir para esto el amplio rango de velocidad empleado. Con el flujo de aire perpendicular a la superficie de evaporación, C es el doble que para un flujo longitudinal.

La relación determinada experimentalmente, solamente es válida en el rango empleado de temperaturas y velocidades de aire. Una extrapolación fuera de esos límites debe realizarse con gran cuidado. La extrapolación de los valores de la velocidad del aire (particularmente para velocidad cero) dan lugar a un error considera---



GRAFICA D°

COMPARACION DE COEFICIENTES DE EVAPORACION

- 1 72 EXPERIMENTOS DE LOS AUTORES
- 2 EXPERIMENTOS DE CARRIER
- 3 EXPERIMENTOS DE NIBUS Y HIRCHLEY
- 4 EXPERIMENTOS DE THIGGENMUSER
- 5 EXPERIMENTOS DE CARRIER
- 6 EXPERIMENTOS DE HORN Y COPLEY
- 7 EXPERIMENTOS DE HORN Y COPLEY

ble. Himus e Hinchley dan la relación:

$$\frac{W}{Z F} = 1000 \frac{H - h}{50} 1.2 \quad (35)$$

Para aire a baja velocidad; la extrapolación de esta fórmula para evaporación con convección a una velocidad de aire cero da:

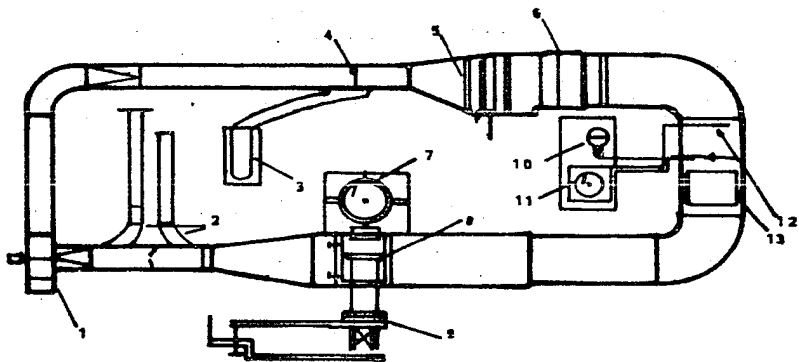
$$\frac{W}{Z F} = 31.0 (H - h) \quad (36)$$

- 2) El segundo trabajo a revisar es el de Shepherd, Hadlock y Brewer (14), que trata de la evaporación en superficies húmedas de arenas.

En este trabajo, se estudia el secado en bandejas, de las superficies húmedas de materiales no-higroscópicos y el efecto de varias condiciones de secado, en el período de velocidad constante, como son: temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, grosor de la capa del material y aislamiento de la bandeja; todo lo anterior, con el objeto principal de obtener un conocimiento evaluable del período de velocidad constante de secado al punto de aplicación práctica en el diseño de secadores. El aparato utilizado se muestra en la figura (2) en forma diagramática.

Este estudio se confinó al secado de materiales no-higroscópicos en bandejas. El material consiste en arena de dos tamaños diferentes: 20-30 mallas y 50-70 mallas. Las partículas individuales de estas arenas se consideran esféricas, y sus características físicas se muestran en la tabla (1). Las pruebas de secado son ejecutadas en un secador tipo túnel de viento, diseñado para dar control de temperatura, velocidad y humedad de aire; y, al mismo tiempo, permitir alterar estas variables en un amplio rango. Las pruebas se realizaron en la sección horizontal del secador, con aire pasado sobre la bandeja paralela a la superficie.

Se utilizan dos métodos alternativos para determinar la pérdida de peso del material húmedo durante el secado: a) la bandeja es soportada de un alambre calibrado, que es conectado al mecanismo de registro de un registrador ordinario tipo dinamómetro, y una gráfica continua, va registrando el peso; y b) la bandeja es soportada en una balanza y el peso es tomado a intervalos frecuen-



- | | | | |
|---|-----------------------------------|----|--|
| 1 | VENTILADOR | 8 | VENTANILLA DE VIDRIO |
| 2 | REFLECTORES | 9 | BALANZA |
| 3 | MANOMETRO | 10 | DEPOSITO DE AGUA PARA EL BULBO MOJADO |
| 4 | PLACA DE CONTROL | 11 | REGISTRADOR CONTROLADOR |
| 5 | HUMIDIFICADOR | 12 | TERMOMETROS REGISTRADORES, DE BULBO SECO
Y HUMEDO |
| 6 | CALENTADORES | 13 | VENTANA DE VIDRIO |
| 7 | REGISTRADOR CONTROLADO
DE PESO | | |

FIGURA 2

**SÉCADOR DE SHEPHERD HADLOCK Y
BREWSTER**

Tabla 1

Características físicas de las arenas de Ottawa

<i>% peso acumulativo retenido en:</i>	<i>20-30 mallas</i>	<i>50-70 mallas</i>
<i>20 mallas</i>	<i>0.4</i>	<i>...</i>
<i>28 mallas</i>	<i>99.6</i>	<i>...</i>
<i>35 mallas</i>	<i>100.0</i>	<i>0.0</i>
<i>48 mallas</i>	<i>...</i>	<i>1.6</i>
<i>65 mallas</i>	<i>...</i>	<i>99.5</i>
<i>100 mallas</i>		<i>100.0</i>
<i>Gravedad específica</i>	<i>2.66</i>	<i>2.66</i>
<i>Densidad a granel, lb/ft³</i>	<i>100.</i>	<i>92.</i>
<i>Espacio vacío, %</i>	<i>40</i>	<i>44</i>
<i>Diámetro promedio de las partículas, pulgadas</i>	<i>0.0314</i>	<i>0.0118</i>

tes. Ambos métodos dan resultados confiables. La temperatura del aire calentado usado para secar, es medido por dos termopares de Cobre-Constantano, localizados cerca de 1/2 pulgada, antes y después de la bandeja y una pulgada abajo del nivel de la superficie de la bandeja. La temperatura de bulbo seco delante de la -- bandeja es tomada por un termómetro de mercurio. La temperatura de bulbo húmedo es medida en el mismo punto por un termómetro de mercurio, cuyo bulbo es humedecido con agua destilada a aproximadamente la temperatura de bulbo húmedo, cada vez que se hace una lectura. Las temperaturas del material durante el secado son registradas por nueve termopares de Cobre-Constantano, localizados en tres grupos de tres termopares cada uno. Uno de esos grupos -- es colocado a una pulgada del contacto entre la bandeja y la corriente, otro en el centro de la misma bandeja y el último a una pulgada del fin del contacto entre corriente y bandeja. En cada grupo los tres termopares son colocados uno sobre el otro y localizados a 1/3 de pulgada, abajo del borde superior de la superficie, otro a 1/8 de pulgada, arriba del fondo de la placa de material y el último en el centro del lecho del material. Estos -- grupos son localizados en líneas equidistantes de las paredes de la bandeja y paralelas a la dirección del flujo del aire.

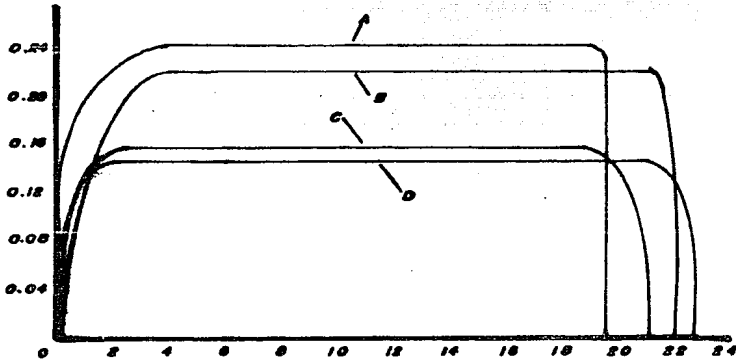
El procedimiento a seguir, es el siguiente: una bandeja tarada -- de 12 pulgadas cuadradas (internas) es llevada a nivel, con una cantidad pesada de arena y agua que son íntimamente mezcladas, -- adicionando suficiente agua a la arena seca para llenar completamente el vacío, pero no al grado de que se evidencie cualquier gran charco. Se pesa la bandeja conteniendo la arena y se coloca en el secador. En todas las pruebas, el secador es operado a las condiciones deseadas de temperatura, humedad, y velocidad de aire por un período de una hora previamente al inicio de las pruebas de secado. Las pérdidas de material son determinadas continuamente por medio del registrador automático, a un intervalo -- frecuente de tiempo por medio de la balanza hasta observar cambio en el peso. (En todos los casos, el contenido final de humedad es menor al 0.05%). La bandeja puede entonces pesarse fuera del secador y una muestra representativa del material, se coloca

en un horno a 220 °F, para determinar el peso seco residual. Las pruebas se corren con arena, para determinar el efecto, sobre la velocidad del secado, de las siguientes variables: velocidad - (125 - 1370 ft/min), temperatura (114 - 303°F), y humedad relativa (10 - 60%) del aire, tamaño de partícula (20 - 30 y 50 - 70 μ m), altura del material (1/2 a 2 pulgadas) y aislamiento de bandeja. Las condiciones tipo de secado son: 150°F de temperatura de bulbo húmedo, 30% de humedad relativa y 300 ft/min. de velocidad de aire, ya que esos valores son promedio aproximado de las condiciones más comunmente empleadas en la práctica industrial. Los resultados experimentales se muestran resumidos en la tab^a - (II) y también en forma gráfica de velocidad de secado v.s. contenido de humedad del material para ilustrar los efectos de cada una de las variables, gráficas E, F, G, H, I, y J.

En dicha tabla, los coeficientes de transferencia de masa y los coeficientes de transferencia de calor corregidos, son reportados para cada una de las corridas experimentales de esta investigación. Estos se aplican únicamente al periodo de velocidad constante de secado. (Cada uno de los coeficientes calculados, de datos de temperaturas tomadas periódicamente durante las corridas. De aquí, que estos valores promedios mostrados, no necesariamente están de acuerdo en aquellos calculados de las temperaturas promedio y datos de presión, también reportados en la tabla II).

Un examen minucioso de los datos, muestra que los coeficientes de transferencia de masa, son considerablemente más erráticos que los coeficientes de transformación de calor. De hecho, en dos casos (pruebas 6 y 7) algunos de los datos individuales, muestran coeficientes de transferencia de masa negativos. Esta amplia variación en los coeficientes de transferencia de masa, es debida a la inseguridad en la determinación de presiones parciales de vapor de agua en el aire por medio de carta psicrométrica y también a los grandes errores en el cálculo de diferencias de presión, resultantes de pequeños errores en las mediciones de temperatura superficial. El error involucrado en la computación de diferencias de temperatura, y por ello, de los coeficientes de transferencia de calor, es considerablemente pequeño. De aquí, que en todas las

Pantcha No.	ΔT ($T - T_0$)	Velocidad Constante de evaporación	Calor latente de evaporación λ	Coefficiente de Transferecia de masa, k	Coefficiente de Transferecia de calor Global (Cada la superficie)	Convección (superficie húmeda)	$\frac{h_c}{k}$
	$^{\circ}F$	Lb/Hq^2	BTU/Lb. agua	$Lb\ agua/Hq^2\ Hr$	BTU/H. Fq^2	$^{\circ}F$	$\frac{h_c}{k}$
1	37.2	0.245	1028	0.0131	6.77	3.11	0.235
2	58.9	0.235	1041	0.0104	4.36	3.56	0.314
3	40.4	0.150	1031	0.0122	3.23	3.22	0.256
3-2	40.0	0.156	1031	0.0104	4.23	3.42	0.250
4	40.1	0.164	1032	0.0347	4.74	3.47	0.098
4-2	41.1	0.163	1031	0.0159	4.23	3.34	0.106
5	39.3	0.080	1030	0.0037	2.09	1.7	0.160
5-2	41.2	0.108	1031	0.0074	2.69	2.21	0.29
6	19.0	0.067	1019	0.0240	3.62	3.73	0.044
6-2	19.0	0.069	1019	...	3.64	3.20	...
7	39.8	0.269	1034	...	7.79	6.38	...
7-2	37.2	0.256	1030	0.0193	7.04	6.49	0.326
8	31.3	0.420	1025	0.0081	3.25	2.88	0.316
9	27.5	0.125	1045	0.0134	4.73	3.79	0.271
10	32.3	0.341	1025	0.0122	4.25	3.40	0.272
11	35.7	0.231	1028	0.0120	6.67	2.99	0.242
12	39.3	0.161	1030	0.0130	4.23	3.55	0.265
13	39.6	0.162	1031	0.0153	4.20	3.63	0.230
14	44.1	0.510	1033	0.0561	11.93	10.94	0.172
14-2	40.5	0.456	1031	0.0374	11.60	10.68	0.275
M-1	38.9	0.226	1031	0.0192	5.99	5.31	0.263
M-2	40.0	0.142	1031	0.0130	3.62	3.01	0.225
M-3	56.6	0.229	1028	0.0184	6.43	2.88	0.265
M-4	41.5	0.106	1030	0.0080	2.59	2.01	0.244
M-5	39.7	0.073	1019	0.030	3.89	3.99	0.131
M-6	39.6	0.327	1031	0.0374	10.09	9.77	0.236

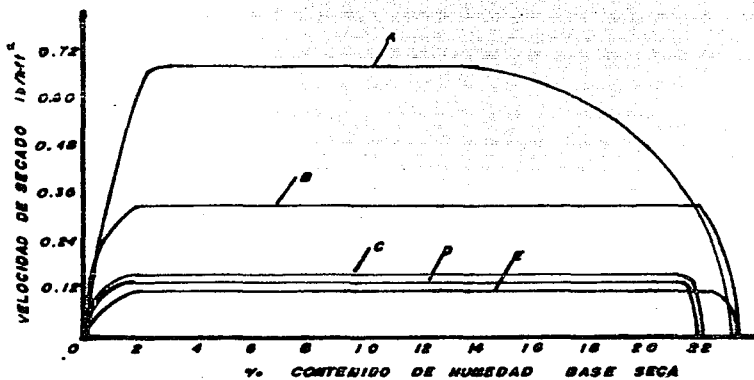


%. CONTENIDO DE HUMEDAD - BASE SECA

- A CORRIDA N° 1 (SIN AISLAMIENTO)
- B CORRIDA N° 2 (SIN AISLAMIENTO)
- C CORRIDA N° 12 (1" DE AISLAMIENTO DE CORCHO)
- D CORRIDA N° 3 (1" DE AISLAMIENTO DE CORCHO)

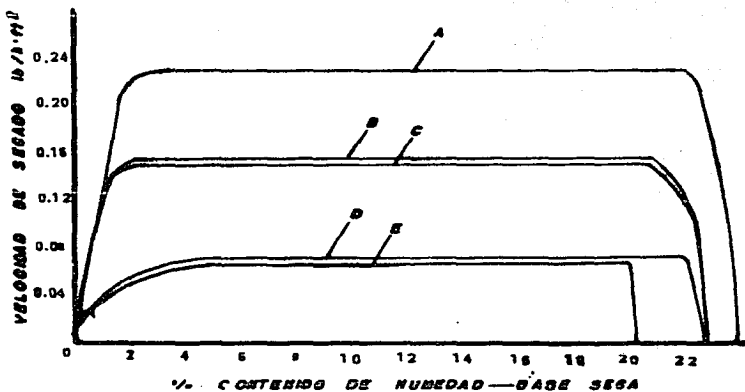
GRAFICA E

EFEECTO DE AISLAMIENTO DE LA BANDEJA



- A** CORRIDA N° 8 (1303° F)
B CORRIDA N° 10 (1203° F)
C CORRIDA N° 3-2 (1181° F)
D CORRIDA N° 3 (1161° F)
E CORRIDA N° 9 (1114° F)

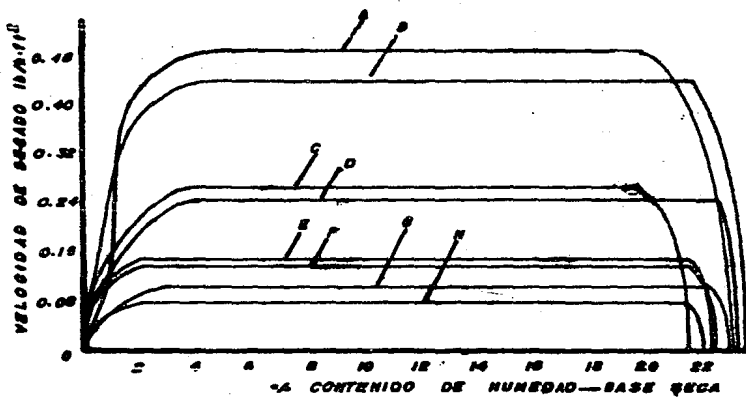
GRAFICA F
EFEECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE



- A CORRIDA N° 2 (110% N.R.)
 B CORRIDA N° 3-2 (129% N.R.)
 C CORRIDA N° 3 (129% N.R.)
 D CORRIDA N° 6-2 (160% N.R.)
 E CORRIDA N° 6 (160% N.R.)

N.R. = HUMEDAD RELATIVA

GRAFICA 6
 EFECTO DE HUMEDAD RELATIVA



A CORRIDA N° 14 (1570 ft/min)

E CORRIDA N° 3-2 (325 ft/min)

B CORRIDA N° 14-2 (1520 ft/min)

F CORRIDA N° 5 (300 ft/min)

C CORRIDA N° 7 (940 ft/min)

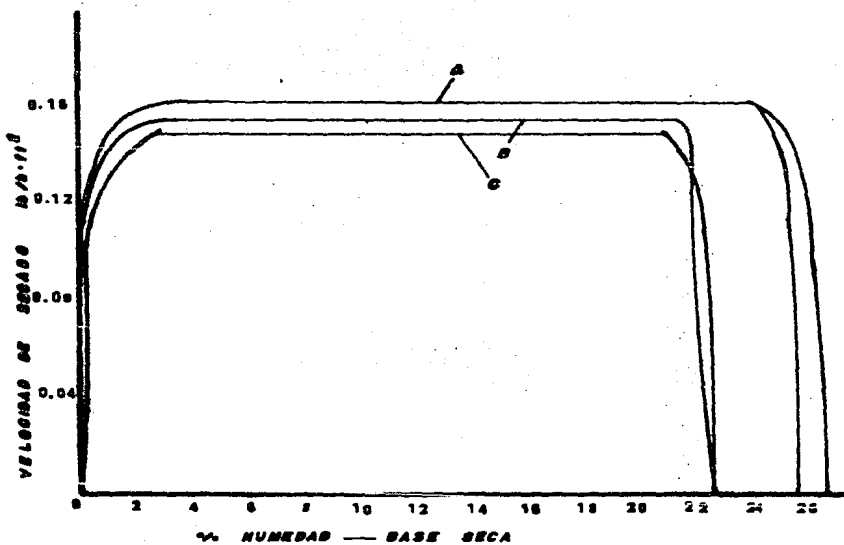
G CORRIDA N° 8-2 (140 ft/min)

D CORRIDA N° 7-2 (920 ft/min)

H CORRIDA N° 6 (125 ft/min)

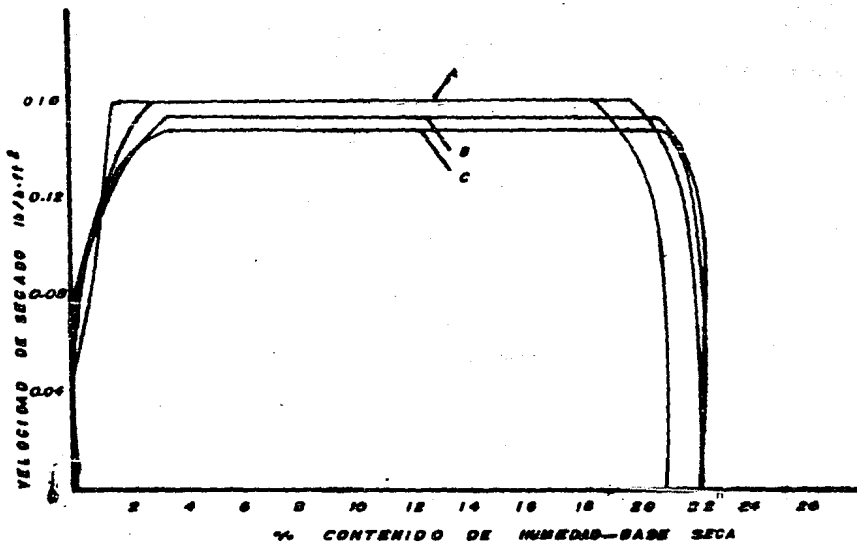
GRAFICA H

EFFECTO DE LA VELOCIDAD DEL AIRE .



A CORRIDAS N°4 Y N°4-2 (50-70 MALLAS)
 B CORRIEN N°20 (20-30 MALLAS)
 C CORRIEN N°2-2120-20 MALLAS)

GRAFICA 1
EFFECTO DEL TAMAÑO DE PARTICULA



- A CORRIAS Nº 12 (12" DE GROSOR) Y Nº 14 (14" DE GROSOR)
 B CORRIAS Nº 11 (11" DE GROSOR)
 C CORRIAS Nº 11 (11" DE GROSOR)

G R A F I C A J

E F E C T O D E L G R O S O R D E L M A T E R I A L .

pruebas, los coeficientes de transferencia de calor son razonablemente uniformes. Tanto los coeficientes de transferencia de masa, como los de transferencia de calor, basados en los datos presentes, varían con el 76% de la potencia de la velocidad másica.

En conclusión, se recomienda usar en los problemas prácticos de secado, los coeficientes de transferencia de calor como base.

La gráfica K, permite una lectura estimativa de las velocidades de secado para variaciones de temperatura y humedad relativa del aire. Dicha carta está basada en la diferencia entre las temperaturas de bulbo húmedo y seco de la corriente entrante de aire. La velocidad absoluta del secado mostrada, está basada en el coeficiente de transferencia de calor de $3.1 \text{ Btu}/(\text{h}) (\text{ft}^2) (^\circ\text{F})$ para aire a $300 \text{ ft}/\text{min.}$ de velocidad, 150°F y 30% de humedad relativa.

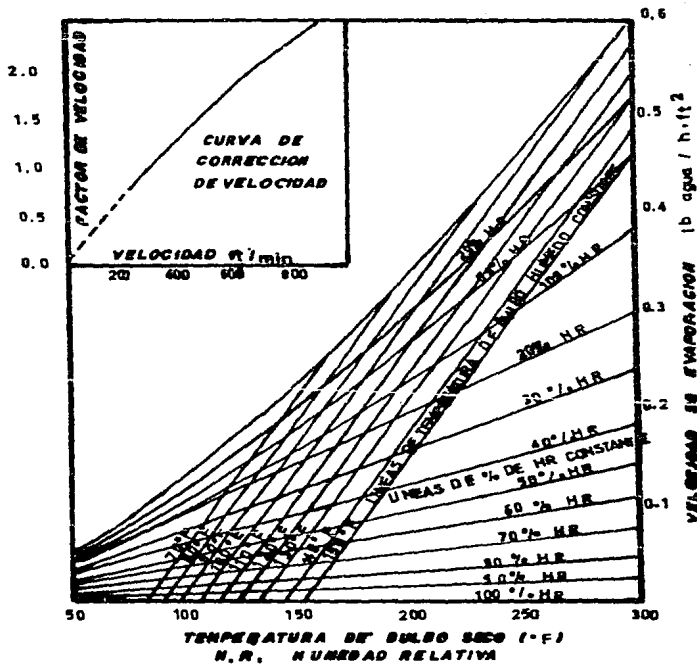
- 3) Continuaremos con el trabajo de Peck, Griffith y Rao, que versa sobre magnitudes de resistencia íntera y superficial, que actúan durante el secado (12).

Se han desarrollado muchas ecuaciones para calcular el tiempo de secado a una concentración promedio de humedad dada, pero la mayoría de esas ecuaciones no son aplicables a materiales en los que varían la difusividad o la capilaridad. El propósito de este trabajo, es el de desarrollar ecuaciones que relacionen la difusión efectiva con el contenido promedio total de humedad y las condiciones de secado. Esas relaciones podrán aplicarse a cálculos de diseño.

El término difusividad efectiva, denota el valor del factor de --proporcionalidad no únicamente para difusión, sino también, para capilaridad o cualquier otra fuerza que pueda causar migración de concentración de humedad, a través del sólido. Como los datos obtenidos son en base al peso total, únicamente se obtienen valores promedio de la difusividad efectiva.

Para comparar los resultados teóricos con los experimentales, se construyó un secador en el que se corrieron las pruebas necesarias.

En este estudio se utilizaron placas de madera balsa, tomadas de la misma reserva, cuyos grosores van de 0.2 a 0.85 pulgadas y --cortadas de tal manera, que cuando pasan al secador, la barra de



GRAFICA K

CARTA DE VELOCIDAD DE EVAPORACION.

madera es paralela a la dirección de la corriente de aire. Previo a la prueba, la muestra es remojada en agua, hasta obtener un peso constante y se seca en el secador hasta lograr una baja concentración de humedad libre inicial que tiene una gran influencia en la velocidad de secado, variando en un rango (la humedad) de 2.5 a 4.0.'

También en este estudio se utilizó un secador tipo túnel, cuya cubierta fue fabricada de acero inoxidable 18-8 calibre No. 20, el cuerpo del secador tiene compartimentos en forma elíptica para -- promover la distribución uniforme de las velocidades del aire que atraviesa la sección de pruebas y para conservar el espacio del -- piso. El cuerpo está aislado con 1 1/2 pulgada de asbesto aislante para prevenir la condensación y, consecuentemente, la pérdida de calor a través de las paredes. Se colocaron aletas en los tubos de entrada y salida de aire, para controlar las cantidades de aire de refresco y recirculación. La velocidad del aire en esta -- sección es uniformemente distribuida por medio de un deflector -- instalado en la sección de prueba. Este deflector consiste en tubos de borosilicato con ejes paralelos a la dirección de flujo, -- se coloca tela de alambre entre la sección de prueba y el bulbo -- húmedo, para ayudar a una mejor distribución de velocidad. La velocidad es determinada al cruzar el ducto, cuando es relativamente constante en la sección de pruebas y es entonces, cuando se inserta el espécimen. Se colocó una pequeña ventana de observación en la puerta de operación, para que el material pueda ser inspeccionado todo el tiempo que dure el proceso de secado; teniendo -- ambas, la puerta de operación en la sección superior y la puerta de mantenimiento en la sección inferior, bordes de caucho para -- prevenir fugas.

El aire es circulado por un autoventilador-soplador, revestido -- con baquelita laqueada, para prevenir corrosión y con aislamientos para prevenir la transmisión de vibraciones. La velocidad del aire en la unidad es regulada por medio de una salida de diámetro variable en el ventilador. Sin embargo, la mezcla de vapor de -- agua y aire, se mantiene gracias a que en la sección inferior, se encuentran dos pseudoventiladores en forma de deflectores con hojas invertidas.

Sistemas de calentamiento. El aire es calentado por unidades de calentamiento, construidas con alambre nicromel, separadas en construcción abierta sobre estructura, localizadas inmediatamente después de la sección baja. Cuatro de las unidades, de cerca de 700 Watts cada una, están conectadas a luces piloto en el tablero de instrumentos y son usadas para calentar el secador rápidamente, usándose las superficies para mantener una temperatura ligeramente superior a la temperatura de operación deseada durante una corrida. Una gran unidad calorífica, de 1300 Watts de capacidad, conectada a un transformador Variac y una unidad de control de temperatura es el equipo utilizado para mantener la temperatura deseada.

Sistema de humidificación. El vapor de agua es introducido en la sección baja, entre los calentadores y los pseudoventiladores inversos como vapor propiamente dicho, que es generado en un pequeño calentador localizado directamente bajo el secador, esa unidad es calentada por un calentador de 1800 W. exclusivo a propósito y un segundo calentador de 600 W. dirigido por otro controlador. El nivel del agua en el hervidor, es mantenido por un flotador y su presión es prevenida por una línea de derrame.

La temperatura de bulbo húmedo es medida y registrada por una unidad separada. El agua destilada que alimenta al termómetro de temperatura de bulbo húmedo es introducida rápidamente al secador y, por lo tanto, sujeta a la temperatura del sistema. Para eliminar la posibilidad de que el agua se consuma por el rápido uso del calentador y la temperatura de bulbo húmedo se altere, un rollo enfriador y un termopar son instalados en el bulbo húmedo para enfriar el agua, justo abajo de la verdadera temperatura de bulbo húmedo. Ambas temperaturas, de bulbo húmedo y seco, se localizan en el centro de la corriente de aire, justo después del inicio de la sección de secado.

Balanza registradora. Las muestras a ser secadas, son suspendidas de un extremo de una balanza, cuyo brazo entra al secador a través de una ranura en el fondo de la cubierta. Se suspendió una cadena en el otro extremo del brazo de la balanza y un delgado condel que va unido a un carrete. La cadena se une en forma de suave curva catenaria al carrete y al brazo, y el balance es mantenido

al recoger o extender la cadena con la variación del peso de la muestra. Esta balanza es controlada por medio de un circuito eléctrico con una placa de contacto en otro lado del brazo de la balanza. Se colocó un tambor registrador en el eje del carrete en donde se obtiene un registro de peso contra tiempo. (Fig. (3).

El secador antes descrito, es mostrado en la figura (4); fue diseñado de tal manera que:

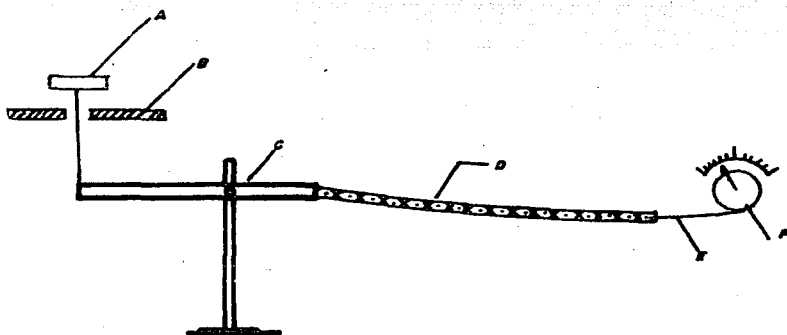
- Mantiene y registra una temperatura de bulbo seco constante, en un valor predeterminado.
- Mantiene y registra una temperatura de bulbo húmedo en un valor predeterminado.
- Tiene una distribución uniforme de la velocidad del aire y temperatura a lo largo de la sección de prueba.
- Proporciona varias relaciones de aire recirculado.
- Maneja un amplio rango de velocidades constantes a valores predeterminados.
- Pesa la muestra en forma automática y continuamente sin interrupción del proceso de secado.
- Es resistente a la corrosión, particularmente a altas humedades.
- Prevee de un medio de observación visual, sin interrupción del proceso.

Respecto a los resultados, la predicción teórica de la relación entre la velocidad de secado y la concentración promedio, corresponde muy bien a lo obtenido con los datos experimentales.

La concordancia es muy cercana, considerando el hecho de que más de quince especímenes se utilizaron en las investigaciones.

Sin embargo, aunque las placas son cortadas del mismo lote, difieren de la orientación de la fibras en las mismas. Los datos tomados por Cheng y Griffith, sobre placas enteramente diferentes, siguen cercanos a las conclusiones presentadas en esta investigación.

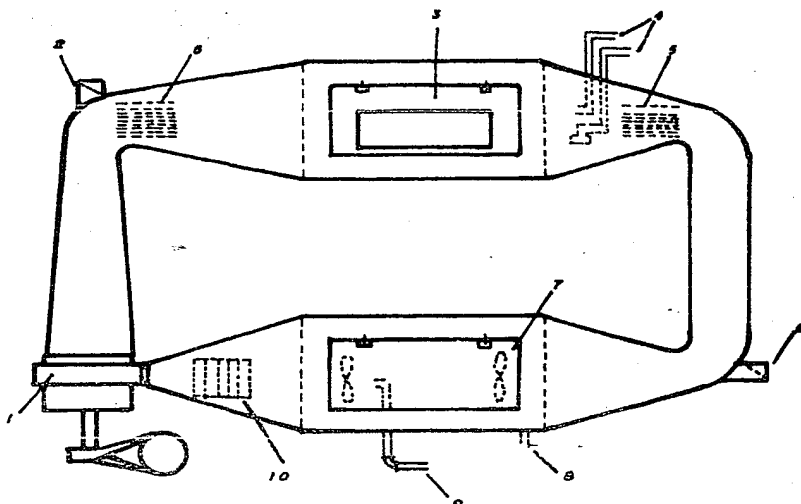
Concluyendo, para placas rectangulares de madera balsa, la gráfica (1) de velocidad contra concentración promedio, da una línea recta en papel log-log en el rango de concentración de humedad, velocidad del aire y grosor estudiados.



- | | | | |
|---|--------------------------|---|-------------------|
| A | MUESTRA | D | CADENA |
| B | PAREO DEL TUNEL DE WENTO | E | CORDON |
| C | BRAZO DE LA BALANZA | F | CARRETE INDICADOR |

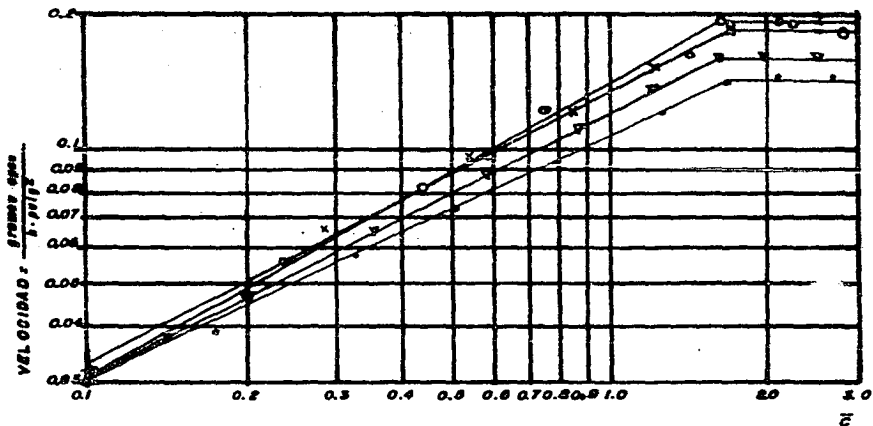
FIGURA 3

SISTEMA DE MEDICION DE MESA DEL SECADOR
DE PECK, GRIFFITH Y RAO



- | | | | |
|---|----------------------------|----|--------------------------|
| 1 | VENTILADOR | 6 | SALIDA DE AIRE |
| 2 | INGRESO DEL AIRE | 7 | VENTILADORES MEZCLADORES |
| 3 | VENTANA DE OBSERVACION | 8 | DREN |
| 4 | A LAS UNIDADES DE REGISTRO | 9 | INGRESO DE VAPOR |
| 5 | DESTRUIDOR DE AIRE | 10 | CALEFACTORES DE AIRE |

FIGURA 4
SECADOR DE PECK, GRIFFITH
Y RAO.



SIMBOLO	CORRIDA	VELOCIDAD	C_0
		ft/sec	
o	21	100	3.08
x	24	82	2.08
v	30	60	2.88
.	33	30	2.87

TEMPERATURA DE BULBO HANCO 100°F

TEMPERATURA DE BULBO SECO 120°F

GROSOR DE LA MUESTRA 0.24"

GRAFICA L

VELOCIDAD — CONCENTRACION PROMEDIO
A DIFERENTES VELOCIDADES

La relación:

$$\frac{d\bar{c}}{d\theta} = -M\bar{c}^{-n} \quad (37)$$

derivada teóricamente, donde M es una función de la difusividad y de la resistencia total a la difusión ofrecida por la placa y la película de aire, \bar{c} es el valor promedio de la concentración de humedad, θ es tiempo y n es un exponente que resulta de resolver la ecuación para la difusión unidireccional del agua a través de un cuerpo rectangular.

$$\frac{\delta c}{\delta \theta} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad (38)$$

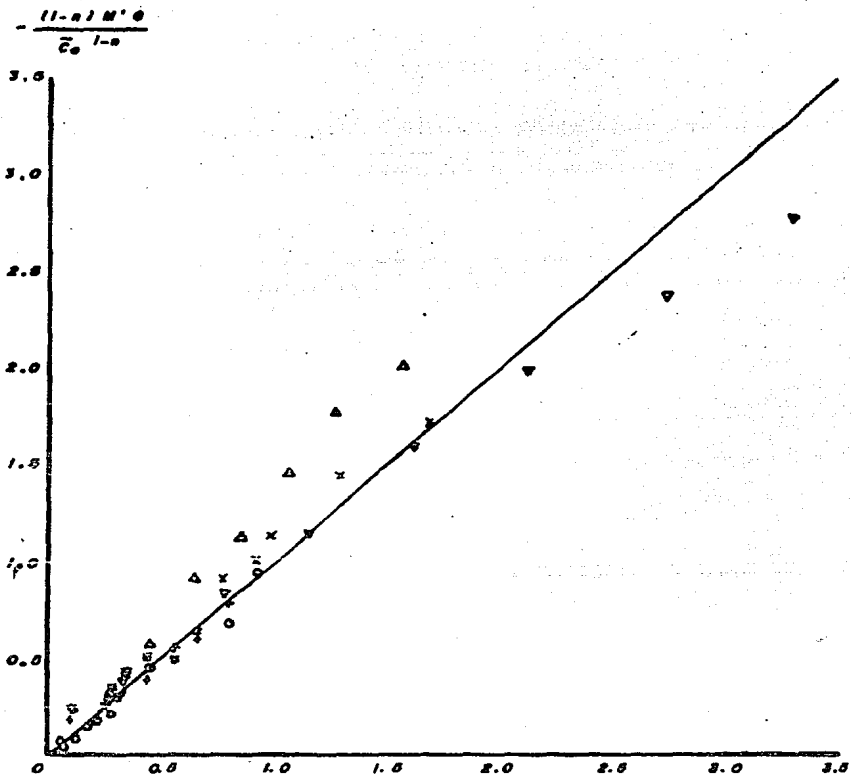
que se resuelve asumiendo que D es constante; luego, aplicando -- este resultado a la ecuación (37), obtenemos:

$$\left[\left(\frac{\bar{c}}{c_0} \right)^{1-n} - 1 \right] = \frac{-(1-n) M \theta}{c_0^{1-n}} \quad (39)$$

con la que puede calcularse la evolución del secado, mostrándose esta concordancia en la Gráfica (M). La gráfica de $1/\sqrt{M}$ versus $1/V^{0.8}$, donde V es la velocidad gaseosa, es una línea recta que, cuando se extrapola a cero el valor de $1/V^{0.8}$, da una intersección proporcional a la resistencia en la fase sólida. Similarmente, la graficación de $1/\sqrt{M}$ versus grosor es una línea recta para placas con un grosor de 0.2 pulgadas, y cuando la línea se extrapola a cero grosor, da una intersección proporcional a la resistencia de la película gaseosa.

- 4) Finalmente se expondrá el trabajo realizado por Nissan, Kaye y -- Bell, sobre mecanismos de secado en el periodo de velocidad decreciente (11).

El trabajo consiste en comparar el secado de dos cuerpos altamente porosos, como son el Terileno (fibra sintética) fabricada con estructura abierta y por otro lado, una franela con estructura -- cerrada. Los paños son colocados en forma de cilindros, y, secados con una corriente de aire caliente en un túnel de secado, con el aire fluyendo paralelo a los ejes del cilindro, que contiene -- termopares indicadores de temperaturas; en tanto que la pérdida --



SÍMBOLO	CORRIDA
○	1
×	4
▽	13
△	20
+	21
□	28

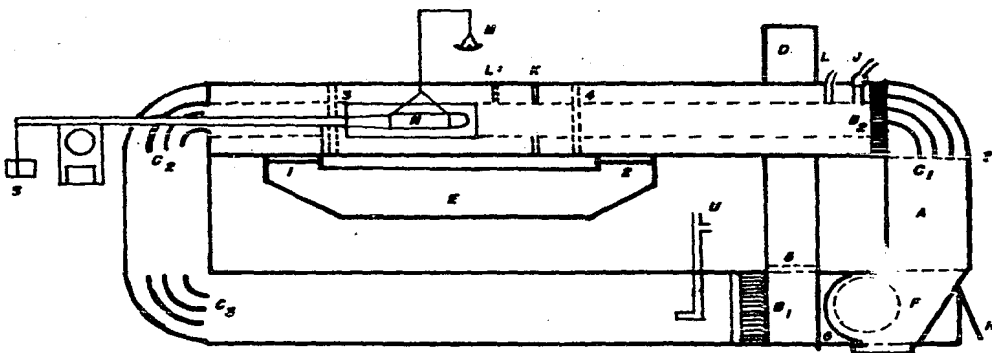
G R A F I C A M
 U B I C A C I O N D E D A T O S

del agua es determinado por pesadas continuas, con una balanza -- analítica. El túnel empleado, es mostrado en la figura (5). La estructura principal es de asbesto de 3/8 de pulgada con una sección transversal de 8 3/4 pulgada², la sección superior tiene forma hexagonal y se le insertan correctores de flujo en los dobles, para reducir el flujo transversal; los mezcladores de flujo proporcionan una distribución uniforme del mismo. El túnel es utilizado con recirculación continua, flujo directo o proporciones - de los dos, por medio de deflectores. El aire es impulsado por un ventilador, a través de la sección de calentamiento, que contiene cuatro elementos de calentamiento con espirales de 1 1/4 KW.

La temperatura es controlada por un termostato y un relevador para dos elementos de espirales caloríficas. La temperatura del aire es medida inmediatamente después de esto, por termopares de -- prueba. El flujo del aire es indicado por un manómetro inclinado de alcohol. La tela es cortada en forma de cilindros entre discos de baquelita y se sitúan termopares entre las capas de tela a varias profundidades.

Conducción de calor. La conductividad térmica aparente de un material seco y poroso, representa la transferencia de calor por un cierto número de formas: la conducción se realiza en sólidos y vacío, y la convección y radiación en vacío. Para pequeñas diferencias de temperatura, el efecto de radiación puede ser pequeño, y la convección puede ser importante sólo en estructuras muy abiertas. La suma de la conducción en sólidos y vacío, puede ser compleja, algunas veces en serie y otras en paralelo, dependiendo de la estructura particular.

La distribución de temperaturas de un cilindro seco, mientras es calentado, da un medio por el que se puede hacer una buena estimación de los coeficientes de conductividad térmica aparentes, proveyendo de suficientes valores, que son calculados para permitir un promedio razonable. Se utiliza el método de división del cilindro en pequeños elementos finitos y usando el cálculo paso a paso, quedando esto, supeditado a que la conductividad no sea constante en la parte final. Utilizando un método similar y pesando - los pequeños elementos, se confirmó, dentro de los límites experi



- | | | | |
|--------------------------|---------------------------------|----------|---------------------------------|
| C_{1,2,3} | DEFLECTORES | S | SOPORTE DE CONTRAPESO |
| B_{1,2} | MEZCLADORES | N | BALANZA ANALITICA |
| 1-7 | CELOSIAS | N | INGRESO DEL AIRE |
| F | VENTILADOR | E | CONTROL DE RECIRCULACION |
| A | SECCION DE CALENTAMIENTO | D | SALIDA DEL AIRE |
| J | TERMOSTATO | U | TUBO PILOTO |
| R | PLACA DE ORIFICIO | H | MUESTRA |
| J. L. L' | TERMOPARES | | |

FIGURA 5

**SECADOR DE NISSAN, KAYE
Y BELL .**

mentales, que hay un retiro del agua superficial hacia el interior del cuerpo, por lo que no es constante el mecanismo por el que se desplaza la humedad hacia el agua de las capas externas. Concluyendo, los textiles altamente porosos, tienen en el fondo de una muestra, un coeficiente de conductividad térmica, que depende del volumen relativo de la distribución del sólido, y del aire. Cerca de la superficie, si la estructura es suficientemente abierta, se puede aplicar un coeficiente de conductividad térmica aparentemente alto, que será afectado por la velocidad del aire en la superficie, debido, aparentemente, a algunas formas de penetración del aire.

Cuando las muestras son secadas así, la velocidad de evaporación decae con el vapor de agua y calor que tiene su paso a través de una creciente capa de material seco por un retroceso del agua superficial.

Cuando esto ocurre, se mantiene una temperatura de equilibrio -- dentro de la porción húmeda, y esta temperatura es la llamada -- pseudo-temperatura de bulbo húmedo. La fórmula obtenida para un balance de calor sencillo es:

$$K (\theta_a - \theta_w) = 2.886 \times 10^{-4} (\epsilon D_r) \lambda_w \frac{(P_w - P_a)}{(T_w - T_a)} \quad (40)$$

Donde:

K = coeficiente conducción térmica, cal/cm seg °C

θ_a = temperatura aire, °C

θ_w = temperatura agua superficial, °C

ϵ = porosidad

D_r = coeficiente de difusión de vapor, cm²/seg

λ_w = calor latente vapor agua superficial

P_w = presión de vapor en la superficie del agua, mm Hg.

P_a = presión parcial en la corriente de aire, mm Hg.

T_a = temperatura absoluta en la corriente de aire, °K

T_w = temperatura absoluta en la superficie del agua, °K

De los trabajos anteriores, se evidencia que, para estudios del secado o trabajos relacionados con el secado, se utilizan los se-

cadores de bandeja tipo túnel de secado, ya que no sólo se utilizaron en los trabajos expuestos, sino también, en todos los trabajos consultados y que se citan en las referencias finales.

III.- SELECCION DEL TIPO DE SECADOR IDONEO.

Ahora se procederá a determinar el secador más adecuado para los usos que requiere el Laboratorio de Ingeniería Química, que incluyen la --realización de prácticas sobre el secado y la investigación; tanto --del proceso de secado, como de problemas relacionados con él, así como la determinación de coeficientes de transferencia de calor, velocidades de evaporación de agua, etc.

Para guiarnos hacia nuestro objetivo, enunciaremos las características que debe tener un buen secador de laboratorio:

- 1.- Debe estar aislado térmicamente.
- 2.- Alcanzar, mantener y registrar un valor constante, predeterminado, de la temperatura de bulbo seco.
- 3.- Obtener, mantener y registrar un valor predeterminado y constante de la temperatura de bulbo húmedo.
- 4.- Lograr y mantener la velocidad, temperatura y humedad del aire, a valores previamente elegidos, así como una distribución uniforme de dichas variables, a lo largo de la zona de experimentación.
- 5.- Permitir el registro del peso de la muestra en forma constante y continua durante todo el proceso, sin interrupción del mismo.
- 6.- Ser resistente a la corrosión, particularmente a altas humedades.
- 7.- Poseer un medio de observación visual de la muestra, sin interrupción del proceso.

Siendo estas las características deseadas, pasaremos a revisar los diferentes tipos de secadores, con el objeto de localizar al que más se adapte al arriba requerido.

En todos los secadores existentes, es posible observar las fases del secado ya establecidas, pero su propia naturaleza permite dicha observación con mayor facilidad en unos que en otros, como veremos a continuación.

Para efectos de estudio sobre el secado, son preferibles los secadores directos, a los indirectos; ya que en los primeros se lleva a cabo la operación en su forma típica: por convección y, además, si se desea, se puede involucrar a la conducción y a la radiación. En tanto, que en los segundos, el calor se transmite por conducción primordialmente. Como ya se vió, hay dos tipos de secadores directos: continuos e intermitentes; todos los continuos se pueden utilizar como intermitentes, pero en los primeros, es el material a secar y no el

fluido secante el que se desplaza, o una combinación de ambos movimientos, por lo que económicamente resultan más onerosos, debido a su dificultad de movimiento del mismo material y a la dificultad de instalar instrumentos de medición en esas condiciones. Experimentalmente, es más sencillo obtener datos del fluido secante en movimiento, que del material en movimiento; ya que los cambios físicos logrados en el material, son mucho más fáciles de registrar, si este último está inmóvil, lo cual se puede observar en el problema de la detección continua del peso de la muestra. Por lo anterior, son preferibles los intermitentes.

Existen básicamente dos tipos de secadores directos intermitentes. que son: de circulación perpendicular y de bandejas; los primeros conllevan algunos problemas como la pérdida de material en forma pulverulenta por arrastre, debido a la misma corriente secante.

El principal problema de los secadores de bandejas, es que son respecto a otros secadores, menos eficiente; pero, en cambio, sus ventajas referente a las facilidades de estudios de secado, son las siguientes:

- Se realiza el secado típico por convección, y si se desea, se puede completar el estudio, incluyendo conducción y radiación.
- El material se mantiene inmóvil y es, consecuentemente, más fácil medir los parámetros que nos interesan y registrarlos.
- La fase en movimiento es el fluido secante de la que también es más fácil registrar las variaciones de sus parámetros que nos son necesarios para el estudio del secado.
- Prácticamente no existen problemas de pérdida de material por arrastre de fluido.
- Es posible, sin gran problema, controlar la velocidad, humedad y temperatura del fluido secante, además de ser relativamente fácil la instalación de registradores continuos de estas magnitudes, que son imprescindibles para el estudio del secado.

La principal deficiencia de los secadores de bandejas, se puede compensar en buena medida, recirculando el fluido caliente, aunque esté cerca de quedar exhausto, respecto a la humedad; con el objeto de no perder tanta energía térmica, como en el caso del simple paso del fluido caliente sobre el material solamente una vez. Por lo mismo, es conveniente utilizar un túnel en forma de anillo, que permita la arte

dicha circulación y recirculación, y la colocación de una bandeja en una zona horizontal del mismo túnel.

De acuerdo con lo anterior, vemos que, un secador de bandejas tipo -- túnel, es el más adecuado para ser un secador de laboratorio, dado -- que cumple con los requerimientos a satisfacción. Independientemente de lo anterior, los investigadores que se han dedicado al estudio del secado, utilizaron un secador muy similar al que se propone, según se expuso en el resumen de los trabajos del capítulo anterior.

Por las razones enunciadas, es que se pasará al diseño del aparato, - de acuerdo con lo esbozado y ajustándose al equipo ya existente en el laboratorio de Ingeniería Química, en última instancia.

IV.- DISEÑO.

En esta sección se determinarán las dimensiones, el equipo y las características específicas del secador, que cumplirán con los objetivos de reproducir y controlar las variables que afectan al secado y los rangos - que deben ser amplios - en los que se podrán cambiar, de modo que permitan la realización de prácticas de ingeniería química referentes a secado, transferencia de masa y de calor y la investigación del proceso mismo, utilizando materiales -- como son los minerales, precipitados, tabletas, semillas, frutas, pastas alimenticias, carnes, textiles, colorantes, etc.

Para lograr esto, en primer lugar definiremos los rangos en los que se podrán alterar las variables que influyen en el secado; -- luego, en base a ellos, se obtendrán las dimensiones y el tipo de equipo necesario. Por ello se utilizarán los promedios reportados por Shepherd, Hadlock y Brewer (14) para las condiciones más comúnmente empleadas en la práctica industrial, las cuales se enlistan a continuación.

Velocidad del aire: 125 - 1370 ft/min.

Temperatura del aire: 114 - 303 °F

Humedad relativa: 10 - 60%

Grosor del material: 1/2 a 2 pulgadas

Tamaño de partícula: 20-30 a 50-70 mallas

En base a estos intervalos de las variables se llevará a cabo el diseño del secador.

Una vez definido el tipo de secador que nos conviene, desarrollaremos sus características específicas para laboratorio.

Dado que es un secador de bandejas, el secador elegido, deberá tener recirculación de aire, por lo que será del tipo túnel cerrado de modo que el aire circule en una sola dirección siempre; debe ser de un largo tal que incluya aparatos de medición de velocidad, temperatura y humedad del aire circulante, aparte de la misma bandeja y un detector de peso; así como dispositivos para obligar al aire a circular, calentarlo y humidificarlo.

También debe tener una entrada de aire fresco y salida de aire exhausto; el material de fabricación del túnel, debe ser inmune al ataque térmico y el debido a la humedad.

Delineadas sus características, se procederá a desarrollarlas.

Dado que se requiere de un dispositivo para que impulse el aire, - el secador debe llevar un ventilador que cumple con las siguientes características:

- A) Que sea de velocidad variable, para que se pueda cubrir el -- rango de velocidades, que va desde 0.65 m/seg. hasta 8.00 - - m/seg. (14).
- B) Que sea inatacable por la humedad del aire caliente circulante, y que resista, al menos, 150°C, durante 24 horas (tiempo máximo de observación).

C) De preferencia, solamente la hélice debe penetrar al túnel.

De lo antes requerido, se desprende que la hélice y la flecha del ventilador pueden estar hechas de un material plástico (polímero), metales o aleaciones resistentes a la oxidación; como el acero inoxidable que, además resiste la abrasión, pues deben prevenirse las posibles fugas por desgaste del material del que está hecha la flecha; la cual estará sosteniendo a una hélice transversal al ducto, por lo que es más conveniente el uso del acero inoxidable por ser comercial, resistente a la tensión, a la corrosión y a la abrasión. Respecto a la hélice, lo adecuado es que también sea de acero inoxidable, puesto que la mayoría de los materiales plásticos no resisten temperaturas superiores a los 100°C, en intervalos de tiempo mayores a dos horas. Las dimensiones de la hélice deberán ajustarse a la medida del túnel, de manera que cubra la mayor área - - transversal posible, de dicho túnel. Una vez determinado el ventilador, pasaremos a hacer lo propio con el medidor de velocidad del aire. Existen varias clases de medidores de flujo, entre los más - conocidos están:

- a) Placa de orificio.
- b) Tubo venturi.
- c) Tubo pitot.

Dichos medidores, tienen una toma de alta presión, otra de baja -- presión, que se pueden conectar mediante ductos flexibles a sensores.

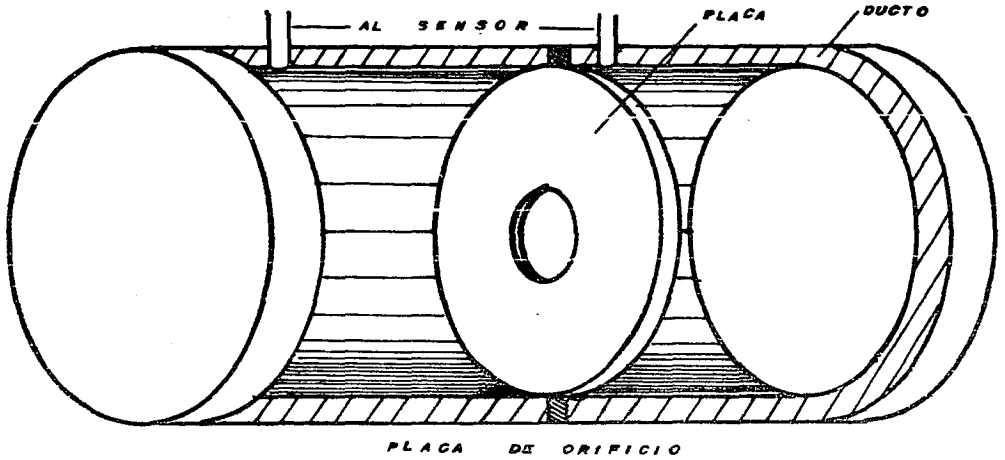
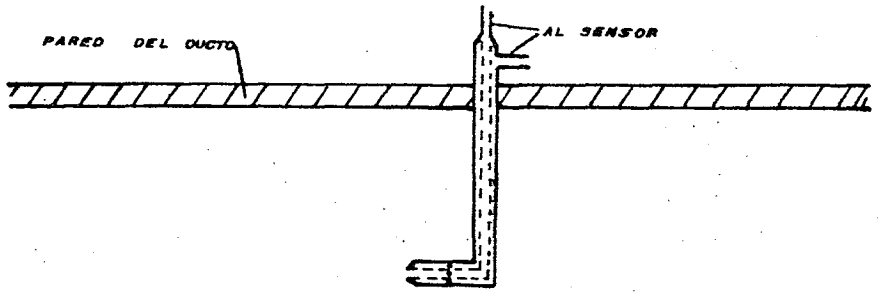
Estos sensores pueden ser, en el más sencillo de los casos, un manómetro de dos brazos, conteniendo un líquido como el Mercurio, -- agua o alcohol, y en el cual se detecta la variación de la presión

por diferencia de niveles producidos por ambas tomas.

Existen numerosas variantes de cada uno de los tres tipos de medidores de flujo nombrados, pero repasaremos sus características generales, a efecto de selección del más útil para este caso.

- a) Placa de orificio: Consiste en una placa con un orificio circular o circular truncado, localizado en el centro o a un lado del centro de la placa, con un borde recto orientando en contra del sentido del fluido y el otro borde, biselado y -orientado en el sentido del fluido. El grosor de la placa, depende de la velocidad del fluido y generalmente es metálica. Su construcción es sencilla, así como su manejo y es, por lo tanto, económica. Su principal desventaja, consiste en la requisición de orificios de toma de presión muy bien hechos --tanto en lo referente a manufactura como a ubicación.
- b) El tubo venturi toma la forma que tiene el fluido al pasar --por una placa de orificio, pero elimina las acumulaciones y -se maneja en forma similar. Su construcción no es muy económica y, debe diseñarse un tubo para cada fluido específico.
- c) El tubo pitot consiste en un tubo en forma de L, más delgado -que el ducto en el cual se va a introducir y con el extremo -doblado, apuntando contra el sentido del fluido. Dentro de este tubo va otro más delgado, unido en el extremo al tubo externo; el tubo interno recibe el impacto directo del fluido, y el externo no, pero tiene orificios en la parte doblada que recibirán al fluido transversalmente, con lo cual habrá diferencia de presión, detectables en un sensor. Es versátil y --preciso, pero más caro que los anteriores.

Por las características enunciadas, vemos que es más conveniente -usar la placa de orificio, por su economía, o el tubo pitot por su precisión. En el Laboratorio de Ingeniería Química, se pueden obtener ambos dispositivos. La placa de orificio, requiere de una longitud, corriente arriba del aire, de cuando menos cinco diámetros; en tanto que el tubo pitot, requiere de diez diámetros; y la imprecisión de la placa de orificio, se puede compensar con una buena -manufactura, aunque sus principales problemas son, precisamente, -la elaboración correcta de la placa, sus tomas de presión y la -gran pérdida de presión que produce permanentemente y que puede au



mentar dependiendo de su diseño y material de construcción.

De cualquier manera, ambos medidores necesitan, para su correcto funcionamiento, de la existencia de un fluido que actúe bajo el régimen turbulento. Sabiendo que el Re depende del diámetro, entre otras variables, podemos, determinado el Re adecuado, calcular el diámetro del túnel.

Aprovechando el conocimiento de determinaciones experimentales en tubería circular, que es la más comercial, el ducto del túnel será circular. Ahora procederemos al cálculo del diámetro más adecuado. Dado que $Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$ y que el Re mínimo, al cual tenemos turbulencia

es de 1×10^4 (6), se requiere conocer la μ y ρ del aire a las condiciones adecuadas, así como la v que se ajuste para dar el diámetro adecuado. Para lograr lo anterior, elegiremos la v mínima, dentro de las condiciones señaladas (14), y que es de 2.08 ft/seg., dado que una velocidad mayor, estaría más cerca de satisfacer el Re señalado; y por la misma razón se utilizarán la mayor viscosidad y la menor densidad. Con los datos solicitados, tendremos completos el juego de valores que nos permitirán obtener el diámetro óptimo del ducto.

La mayor viscosidad está dada a 303°F y es de 0.0237 cp., o bien - 0.159×10^{-4} lb/ft-sec; la menor densidad también está dada a esa temperatura y es de 0.0523 lb/ft³ (6).

Despejando D, de la fórmula del Re queda:

$$D = \frac{Re \mu}{v \rho}$$

y sustituyendo los datos de v , μ y ρ antes seleccionados, queda:

$$D = \frac{(1 \times 10^4) (0.159 \times 10^{-4} \text{ lb/ft-sec})}{(2.08 \text{ ft/seg.}) (0.0523 \text{ lb/ft}^3)} = 1.46 \text{ ft.}$$

$$D = 1.46 \text{ ft} = 1.46 \text{ ft} \times \frac{12 \text{ pulg}}{1 \text{ ft}} = 17.52 \text{ pulg.} \approx 18 \text{ pulg.}$$

De lo anterior, concluimos que el diámetro más adecuado es el de -- 18 pulg., para asegurar el régimen turbulento del flujo del aire y por ser medida comercial. La longitud del tubo debe ser de, al menos, cinco diámetros antes y después de la placa de orificio y diez diámetros antes y después del tubo pitot, y no debe haber obstácu--

los en el camino del fluido en toda la sección mencionada. De aquí que la longitud del ducto libre, debe ser de 4.57 m., 6 - de 9.14 m., en línea recta; de los que corresponden 2.28 m. 6 - - 4.57 m. para la placa de orificio o el tubo pitot, respectivamente.

Para que la velocidad medida sea lo más cercana posible a la que llegue a la bandeja, el túnel tendrá un perfil circular en todas sus partes, y en cada giro que debe hacer el aire, llevará en su parte final un mezclador consistente en una rejilla de acero inoxidable; la caída de presión provocada por dicho mezclador, se -- desprecia.

El material de manufactura del ducto, debe ser inatacable por la humedad y aislante, de modo que se puede utilizar acero inoxidable con lana aislante o asbesto directamente, la decisión final, será desde el punto de vista económico.

La bandeja estará confinada en un ducto que tendrá 43 cm. de diámetro.

Deberá poder contener un volumen de dos litros y tener dos pulgadas de altura, para que sea comparable a las bandejas de los secadores industriales y que tengan cierto rango de capacidad, de modo que la arista de la base debe ser de:

$$V = a^2 \cdot h, \quad a = \sqrt{\frac{V}{h}} = \sqrt{\frac{2000 \text{ cm}^3}{5 \text{ cm}}} = \sqrt{400 \text{ cm}^2} = 20 \text{ cm.}$$

El material de hechura de la bandeja, deberá ser inoxidable, aislante y muy reflejante, de modo que el material adecuado sería - asbesto en las paredes y rejillas de acero inoxidable en el fondo, para evitar conducción y radiación.

Al determinar las unidades calefactoras, debemos calcular la carga térmica, por lo que hay que conocer el flujo volumétrico máximo del aire y la máxima temperatura a la que se va a elevar el ai re, para determinar la cantidad, tipo y colocación de los calenta dores.

Primero calcularemos el flujo volumétrico, con la velocidad máxima (14), el diámetro previamente seleccionado y sin recirculación.

$$m = 1370 \text{ ft}^3/\text{min}, \quad d = 1.5 \text{ ft}, \quad A = \pi (0.75 \text{ ft})^2 = 2.356 \text{ ft}^2$$

$$G = VA = (1370 \text{ ft}/\text{min}) (2.356 \text{ ft}^2) = 3228 \text{ ft}^3/\text{min}.$$

Ahora calcularemos la masa proporcionada por el gasto.

$$\rho_{\text{aire}} = 1.12 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$3228 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} = 3228 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \times \frac{0.0284 \text{ m}^3}{1 \text{ ft}^3} \times \frac{1.12 \text{ Kg.}}{1 \text{ m}^3} = 102.7 \frac{\text{Kg}}{\text{min}}$$

Se considera que la temperatura mínima del aire, en la entrada al túnel, será de 45.5° (114°F), ya que habrá un precalentador externo, que elevará la temperatura del aire desde la ambiental hasta la indicada, y un calentador interno que aumentará la temperatura desde la misma -45.5°C -hasta un máximo de 150.6°C (303°F) (14) - según se requiera; la carga térmica del precalentador considerará que el aire ambiental puede estar a 0°C , por lo tanto:

$$m = \frac{102.7 \text{ Kg.}}{\text{min}} = \frac{226.5 \text{ lb.}}{\text{min}}, \text{ cp} = 0.25 \text{ BTU}/\text{lb} - ^\circ\text{F},$$

$$\Delta t = (45.5 - 0) ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = (114^\circ\text{F} - 32^\circ\text{F})$$

$$\frac{Q_1}{\theta} = \frac{m \text{ cp} \Delta t}{\theta} = \frac{(226.5 \text{ lb}) (0.25 \text{ BTU}) (114 - 32) ^\circ\text{F}}{\text{min} \text{ lb } ^\circ\text{F}} = 4643.3 \frac{\text{BTU}}{\text{min}}$$

La carga térmica del calentador será:

$$\frac{Q_2}{\theta} = \frac{(226.5 \text{ lb}) (0.25 \text{ BTU}) (303 - 114) ^\circ\text{F}}{\text{min} \text{ lb } ^\circ\text{F}} = 10702 \frac{\text{BTU}}{\text{min}}$$

Luego entonces, si tanto el calentador como el precalentador tienen elementos calefactores eléctricos, habrá que elegir el adecuado. Normalmente, los materiales utilizados como resistencias calefactoras que mejor resisten la corrosión son:

<u>Material</u>	<u>Metales aleados</u>	<u>Temperatura máxima de Operación ($^\circ\text{C}$)</u>	<u>Resistividad (Microhms - cm)</u>
Nicromel III (Ni, Cr, Fe)		1 100	112
Nicromel V (Ni, Cr)		1 100	108
Tofet	(C, Ni, Cr, Fe, S)	1920	112

Del cuadro de propiedades físicas de los materiales enunciados, - se observa que los más adecuados, dada su resistividad son el - - Tofet C y el Nicromel III. Por su temperatura de operación máxi- ma, sería mejor usar el Tofet C, pero es muy difícil localizarlo en el mercado. Por ello, la selección se inclina por el Nicromel III, y el diseño de los elementos calefactores se hará consideran- do la utilización de este material.

Primero calcularemos la cantidad de Kilowatts (KW), que se requie- ren en el precalentador y en el calentador.

$$P_1 = \frac{Q_1}{\theta} = 4643.3 \frac{\text{Btu}}{\text{min}} \times \frac{252 \text{ cal}}{1 \text{ Btu}} \times \frac{1 \text{ Kcal}}{1000 \text{ cal}} \times \frac{69.8 \text{ W}}{1 \text{ Kcal/min}} = 81 \text{ 673W}$$

$$= 81.7 \text{ KW.}$$

$$P_2 = \frac{Q_2}{\theta} = 10 \text{ 702} \frac{\text{Btu}}{\text{min}} \times \frac{252 \text{ cal}}{1 \text{ Btu}} \times \frac{1 \text{ Kcal}}{1000 \text{ cal}} \times \frac{69.8 \text{ W}}{1 \text{ Kcal/min}} = 188 \text{ 244 W}$$

$$= 188.2 \text{ KW.}$$

Por ser cantidades bastante grandes de KW las requeridas, en el - caso del precalentador se usará un banco de nueve resistencias -- capaces de proporcionar 10 KW cada una, además de poseer su pro- pio interruptor cada una, para ponerlas en funcionamiento, confor- me se vayan necesitando. Se propone que las resistencias indivi- duales, sean de 10 KW, porque pueden ser sustituidas en cierto mo- mento, por otras que sean comerciales, ya que de ese mismo valor sí existen en el mercado. El conjunto tendrá un control fino, me- diante un variador de voltaje (Variac). Para conocer la cantidad de energía entregada al sistema, se requiere conocer, tanto el -- voltaje como la intensidad de corriente y por ello se tiene que - colocar un amperímetro a una de las resistencias; con ello conoce- remos la intensidad de la corriente que circula por las otras re- sistencias, puesto que son iguales y la corriente se distribuye - uniformemente. El voltaje nos lo dá el Variac, directamente. La - colocación del amperímetro se tiene que realizar en forma diferi- da, puesto que los amperímetros que posee el Laboratorio de Inge- niería Química, sólo llegan a medir hasta 2 amperes.

El circuito que se propone para la colocación del amperímetro, se ilustra en la figura (6) y lleva 27 resistencias de 0.089 Ohms a 0.5 Watts, para evitar al máximo, la disipación de la energía; --

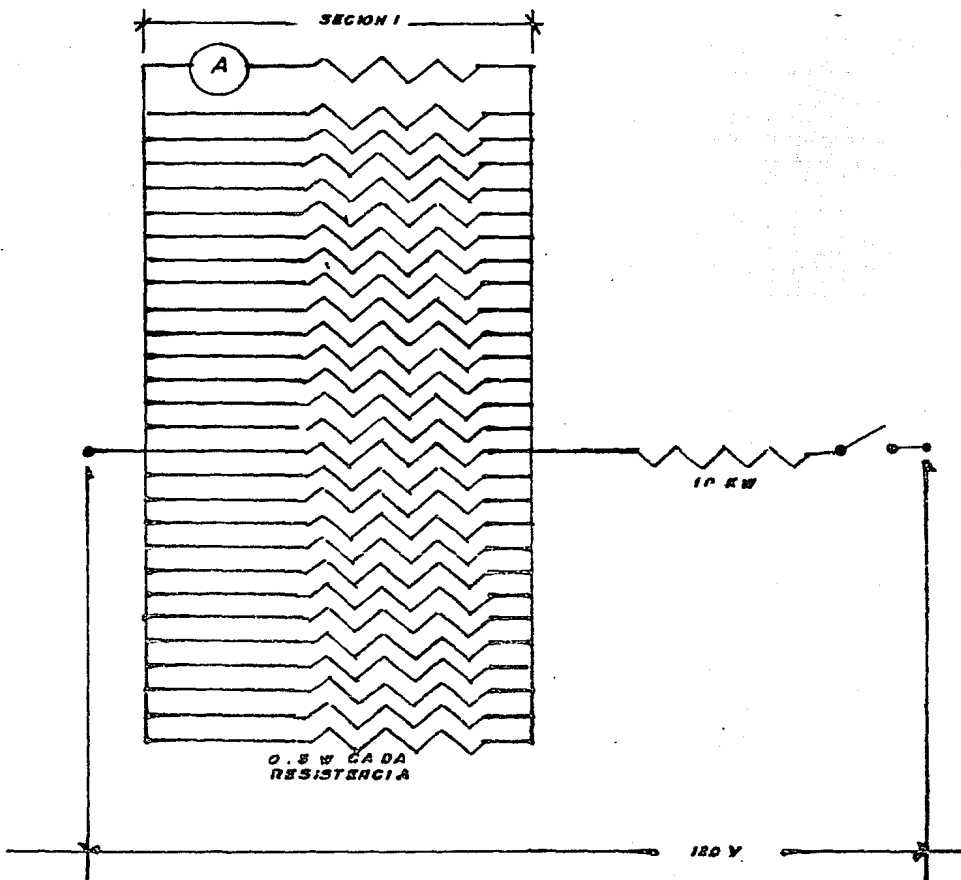


FIGURA 6
CIRCUITO DE INSTALACION DEL
AMPERIMETRO

siendo un caso similar al anterior, de modo que la intensidad --
máxima en cada resistencia es:

$$I_m = \frac{50 \text{ Amp}}{27} = 1.85 \text{ Amp.}$$

la potencia máxima disipada en cada resistencia es:

$$P = I^2 R = (1.85 \text{ Amp.})^2 (0.089 \text{ Ohm}) = 0.3 \text{ W}$$

que es menor al medio Watt permitido por la resistencia. Luego,
para conocer la intensidad de corriente total que pasa por el --
precalentador, hay que multiplicar la lectura del amperímetro --
por 135.

Enseguida calcularemos la cantidad de metros de Nicromel III ca-
libre 30 que se requieren para estas resistencias; considerando
que para este calibre el área transversal del cable es:

$A = 0.51 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, que el Nicromel III tiene una $\rho = 112 \times 10^{-8}$
 $\Omega\text{-m}$, que el voltaje es de 120 V y que cada resistencia tiene una
 $I = 1.85 \text{ Amp.}$, entonces:

$$L = \frac{A \cdot V}{I \cdot \rho} = \frac{0.51 \times 10^{-7} \text{ m}^2 (120 \text{ V})}{1.85 \text{ Amp.} (112 \times 10^{-8} \Omega\text{-m})} = 2.9 \text{ m}$$

por lo que longitud total aplicada es de: $L_t = 2.9 \text{ m} \times 27 \times 2$
 $= 156.6 \text{ m}$

Calcularemos el número de metros de Nicromel III, que se requie-
ren para el precalentador, considerando que se usará alambre ca-
libre 18.

$P_1 = 81.7 \text{ KW}$, con 9 resistencias de 10 KW cada una:

$$10 \text{ KW} \times 9 = 90 \text{ KW}$$

$$P'_1 = 10000 \text{ W}, I = \frac{10000 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 83.3 \text{ Amp.}, \text{ para alambre calibre 18}$$

el Area $A = 8.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, el Nicromel III tiene una

$\rho = 112 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$, por lo tanto:

$$L = \frac{A \cdot V}{I \cdot \rho} = \frac{8.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2 (120 \text{ V})}{83.3 \text{ Amp} (112 \times 10^{-8} \Omega\text{-m})} = 1.05 \text{ m.}$$

Para las 9 resistencias $L_t = 9 \times 1.05 \text{ m.} = 9.5 \text{ m.}$

Para el calentador se usará el mismo sistema, bancos de resisten

cia, pero que en este caso serán de 19, también de 10 KW cada una, con su respectivo interruptor. El sistema lleva su propio Variac, que nos dará la medida del voltaje, y su amperímetro de 0 a 2 Amperes, unido a un banco de resistencias, que a su vez está unido a una de las resistencias de 10 KW, como en el caso del precalentador; siguiendo el mismo procedimiento para la lectura del amperaje. Ahora calcularemos la cantidad de metros de Nicromel calibre 18, que se requieren para el calentador.

$P_2 = 188.2 \text{ W}$, con 19 resistencias de 10 KW cada una:
 $10 \text{ KW} \times 19 = 190 \text{ KW}$

$P_1^2 = 10000 \text{ W}$, $I = \frac{P}{V} = \frac{10000\text{W}}{120\text{V}} = 83.3 \text{ Amp}$, $A = 8.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ para el alambre calibre 18, el Nicromel tiene una $\rho = 112 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$, y por lo tanto:

$$L = \frac{AV}{I\rho} = \frac{8.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2 (120\text{V})}{83.3 \text{ Amp.} (112 \times 10^{-8} \Omega\text{-m})} = 1.05 \text{ m.}$$

Para las 19 resistencias: $L_T = 19 \times 1.05 \text{ m} = 19.95 \text{ m}$.

El arreglo de las resistencias en el caso del precalentador, será en forma de espiral, sostenidas por un soporte de asbesto, -- que será uno para cada resistencia de este equipo, en forma de cruz. El alambre irá doblado como resorte, para disminuir su volumen. El conjunto estará montado dentro de un ducto del mismo material, pero fuera del túnel de secado.

El calentador llevará un arreglo igual al de precalentador, excepto que tendrá más soportes de las resistencias, puesto que lleva 19 de ellas, en lugar de las 9 del precalentador. En ambos casos, las resistencias utilizadas para poder medir el amperaje, el amperímetro (sección 1 de la figura 6) y los interruptores de encendido de las resistencias de 10 KW., van fuera del ducto. Los dos arreglos se muestran en la figura (7) y sus diagramas unifilares en la figura (8). Por supuesto, el calentador irá antes de la bandeja.

Se desprecia la caída de presión causada por el choque de la corriente del aire con el calentador; de modo que la velocidad medida es prácticamente constante desde la zona de medición hasta

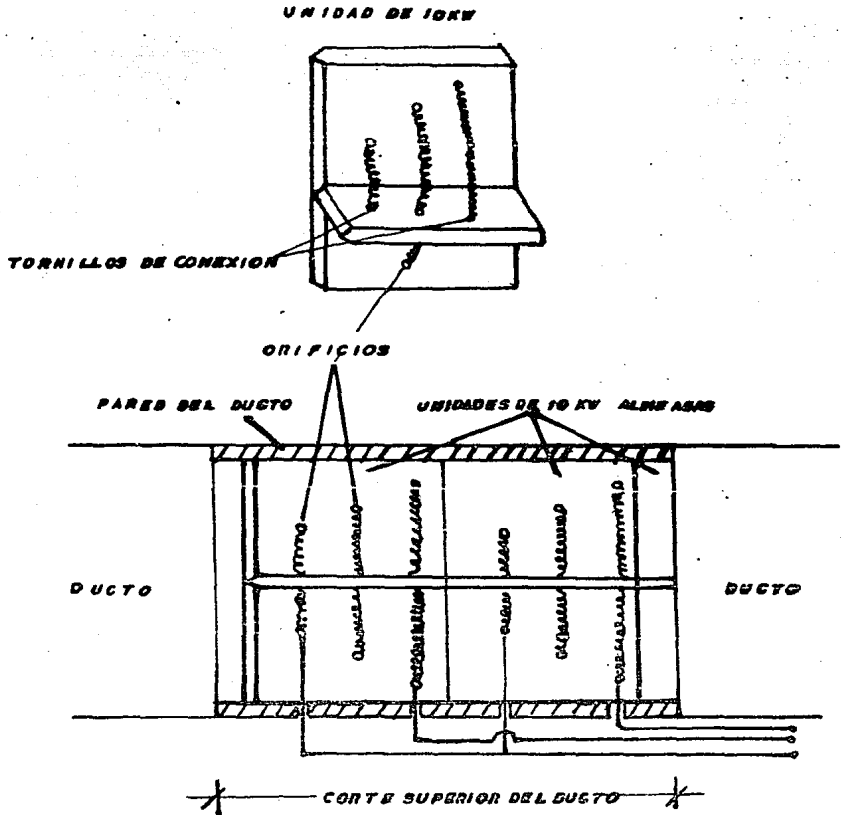
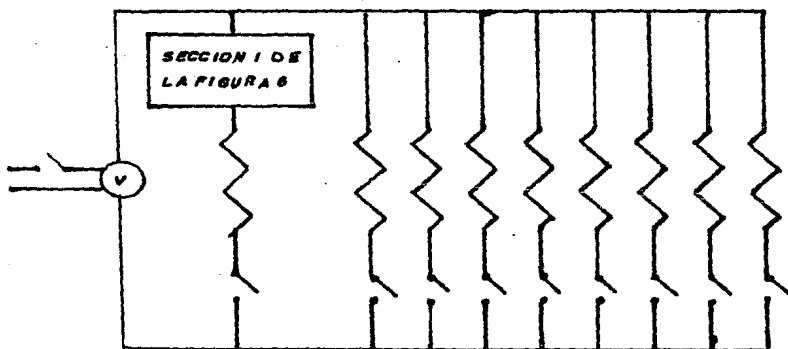
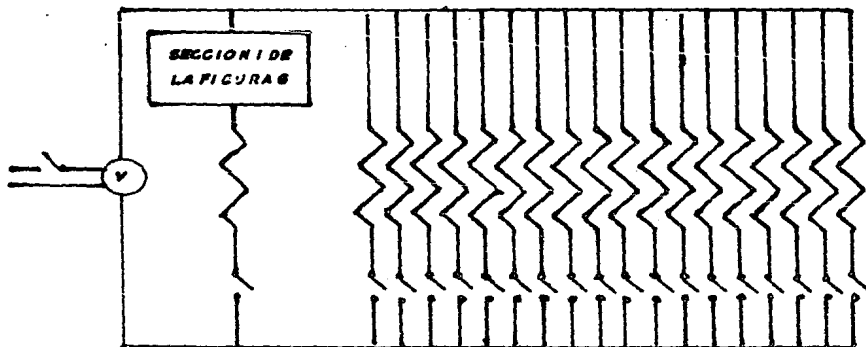


FIGURA 7

ARREGLO DE LOS CALENTADORES



AI PRECALENTADOR



BI CALENTADOR

FIGURA 8

DIAGRAMAS UNIFILARES DEL PRECALENTADOR Y DEL CALENTADOR

NOTA: CADA RESISTENCIA INDICADA ES DE 10RV

la bandeja.

El siguiente punto, es la forma en que se va a medir la temperatura en el seno del material. Esto se efectuará en base a termopares dispuestos en tríos. La altura a la que se hundirán los tres termopares es diferente: cada batería que encontrará el aire en su curso tendrá un termopar a 1/2 pulg. de profundidad, -- otro a una pulg., y el tercero, sumergido a 1 1/2 pulg. en el -- material, a partir de la superficie del material a secar.

Los alambres de los que se compondrán los termopares, deben satisfacer las siguientes características:

- Relación bien definida entre temperatura y F.E.M.
- Rango de utilización bien definido.
- Resistencia a cambios provocados por evaporación, difusión, oxidación, corrosión y contaminación.
- Estabilidad química.
- La F.E.M. más alta posible.

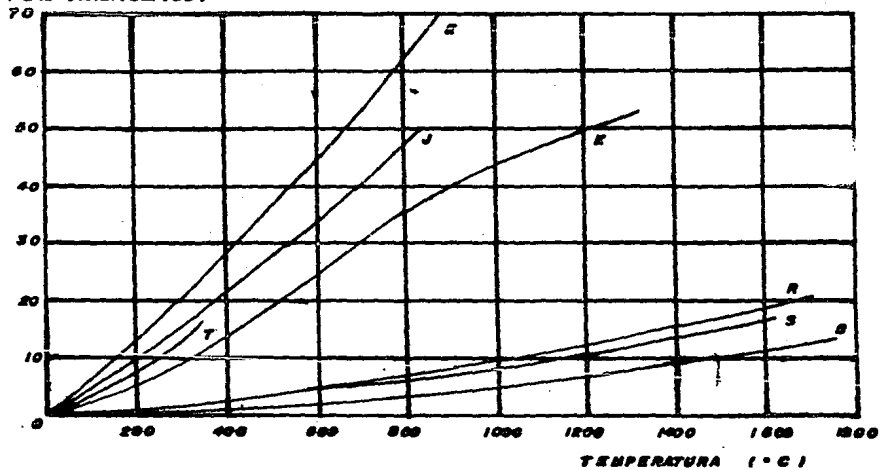
Más adelante se presenta la gráfica N, que muestra la relación F.E.M. - temperatura máxima de operación.

En la gráfica se ve, que los tipos de termopares más adecuados por su alta F.E.M. son el E, J y T. Sus características individuales son:

- El tipo T formado de Cobre (positivo) y Constantano (negativo); se puede usar en vacío, en atmósfera inerte, oxidante o reductora. Su conductor positivo, de cobre, tiene resistencia superior a la corrosión en atmósferas húmedas.
- El tipo J construido de Hierro (positivo) y Constantano (negativo), también se puede usar en vacío, en atmósfera inerte oxidante o reductora. Su mayor peligro es la oxidación o fragilización del hierro.
- El tipo E constituido por Cromel (positivo) y Constantano (negativo); que se puede usar en atmósfera inerte y oxidante, y a temperaturas bajo cero no es sujeto a corrosión.

Al tipo J lo podemos eliminar por su tendencia a la fragilización, al elegir entre el tipo T y el E, vemos que es más conve-

FEM (MILIVOLTIOS)



GRAFICA N

TEMPERATURA — F.E.M. DE TERMOPAR

niente el primero por su superior resistencia a la corrosión en atmósferas húmedas, que es donde va a trabajar.

Conviene que los termopares sean fabricados en el laboratorio, para economizar. Se pueden manufacturar con resina moldeable, de modo que tengan la termounión en un extremo y la resina quede rosca en el otro extremo, de manera que se puedan girar para hundirlos a la profundidad deseada; girarán soportados en una contrarosca unida a un soporte general para todos los termopares, que estará sostenida directamente sobre la bandeja.

Todos los termopares estarán unidos a un selector y de ahí, a un registrador de milivolts, cuya lectura se podrá interpretar con una carta que relacione temperatura con F.E.M. o directamente o un lector de temperaturas.

Los termopares deberán ser, si se manufacturan en el laboratorio, de una sola pieza, desde la unión entre sí hasta la conexión con el selector. Y saldrán todos juntos del túnel por una abertura a propósito, evitando al máximo las fugas de aire, con un sellador. El selector se usará para seleccionar el termopar, cuya lectura nos interesa, al momento de medir la masa de la muestra.

Es importante que las determinaciones de masa se realicen con instrumentos de precisión, puesto que la finalidad del secado es la pérdida del agua de algún material. Para ello, se propone que la charola de secado sea sostenida por no más de tres soportes apoyados directamente en el plato de la balanza, electrónica de ser posible. Como los soportes entrarán al túnel, los conductos por los que penetren deben ser lo más ajustado posible, pero sin impedir el movimiento de dichos soportes, los cuales deberán estar fijos al plato de la balanza y hechos de acero inoxidable. Una posible solución al problema de las fugas por los agujeros donde se moverán los soportes es usar broches de hule tipo remache, que sobresalgan de la pared del túnel.

Ahora veremos lo relativo a la humedad del aire.

La humedad debe ser controlada a la entrada del túnel, para poder observar su variación tras abandonar al contacto de la bandeja; para ello se requiere que el aire que ingrese como aire fresco al túnel, lo haga completamente seco. Entonces, el aire, que

proviene de un compresor, pasa a un secador de aire, para dejarlo libre de humedad, luego es calentado en el precalentador donde -- permanece hasta su ingreso al túnel; ahí es impulsado por el ventilador, después es medida su velocidad, ya integrado a la corriente principal, y finalmente se le agrega vapor de agua por medio de una esprea, para ajustar la humedad requerida antes de llegar al calentador principal. De ahí, el aire contacta con la bandeja, tras serle medidos sus temperaturas de bulbo húmedo y seco, lo cual nos dá la humedad y nos indica si debemos agregar más o menos vapor.

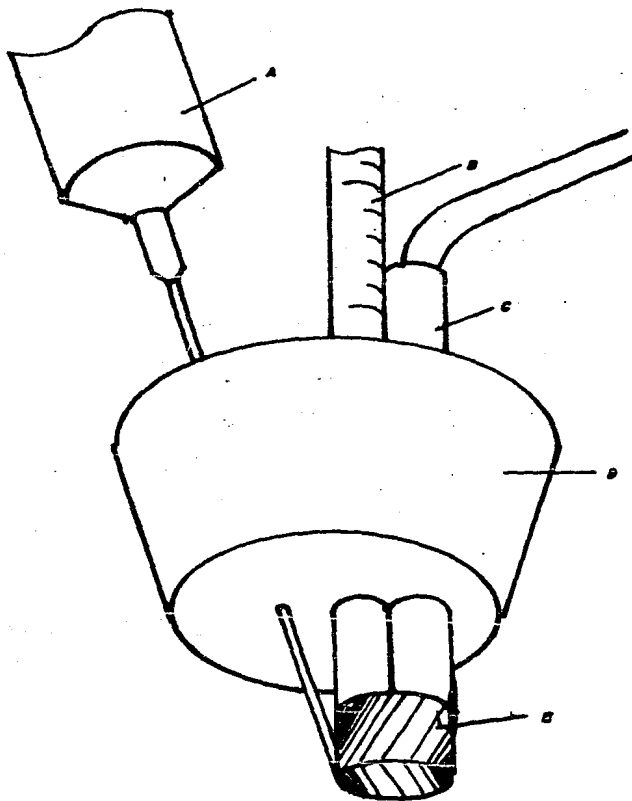
Los detectores de humedad serán tres termopares y tres termómetros dentro del túnel de secado. Un termopar y un termómetro medirán directamente la temperatura de bulbo seco y los otros dos termómetros medirán la temperatura de bulbo húmedo; para ello deberán tener el bulbo y la unión metálica, respectivamente, cubiertos con una gasa fija, que podrá mojarse mediante unas jeringas cuyas agujas apunten hacia las gasas, con agua a temperatura cercana a la de bulbo húmedo.

Tanto los termopares como los termómetros y las jeringas, estarán soportadas en un tapón de hule, de manera que formen una unidad, amoldable al orificio que tendrá el túnel. Se usarán tres de estos conjuntos: uno entre el pulmón y el túnel, para verificar la humedad del aire fresco, otro antes de que el aire contacte con la bandeja, y el tercero, después del contacto con la bandeja.

Los termopares también estarán conectados al selector con su propio canal. En la figura (9), se presenta un diagrama del conjunto propuesto.

Para controlar el flujo o el porcentaje de éste, que se recircule, se colocará antes del ventilador, entre la salida del aire exhausto y la entrada de aire fresco, una válvula de mariposa para, en caso necesario, cortar el paso del aire totalmente e impedir la recirculación; o bien, abrirla totalmente y permitir el libre paso del aire en recirculación total con la consecuente cerradura de --

las válvulas de aire fresco y exhausto. En caso de recirculación parcial, la entrada y salida del aire se ajustarán con deflectores. De modo que el diagrama final del secador completo se muestra en la



- | | | | |
|---|------------|---|---------------|
| A | JERINGA | D | TAPON DE HULE |
| B | TERMOMETRO | E | TELA |
| C | TERMOPAR | | |

FIGURA 9

ARREGLO DE TERMOPAR Y TERMOMETRO PARA DETERMINAR TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

figura (10).

Se anexan los planos detallados de 1 secador para el caso de su -- construcción con los equipos indicados en este trabajo, así como -- los correspondientes a la estructura que soportaría al secador. Pa -- ra esta última, el material adecuado, tanto por su costo como por -- su disponibilidad en el Laboratorio de Ingeniería Química, es el -- acero al carbón, con perfil L (ángulo) de 3/4 y 1/2" con cinchos -- de solera de 1/2 pulgada como se muestra a continuación.

El secador, en su parte más larga, tiene una longitud de 9.5 m., -- el peso del ducto es de 65 kg/m, entonces:

$$9.5 \text{ m} \times 65 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 617.5 \text{ kg.}$$

considerando que ese tramo descansará en cuatro apoyos:

$$\frac{617.5 \text{ kg.}}{4 \text{ apoyos}} = 154.4 \frac{\text{kg}}{\text{apoyo}}$$

luego revisando cada apoyo como viga simple con carga concentrada -- en el centro, mostrada en la figura 11, queda:

$$R = V = \frac{154.4 \text{ kg}}{2} = 77.2 \text{ kg.}$$

$$M_{\text{máx}} = \frac{Pl}{4} = \frac{154.4 \text{ kg} \times 50 \text{ cm.}}{4} = 1,930 \text{ kg-cm}$$

$$\Delta_{\text{máx}} = \frac{pl^3}{48 EI}$$

donde:

R = Reacción

V = Corte

P = Carga

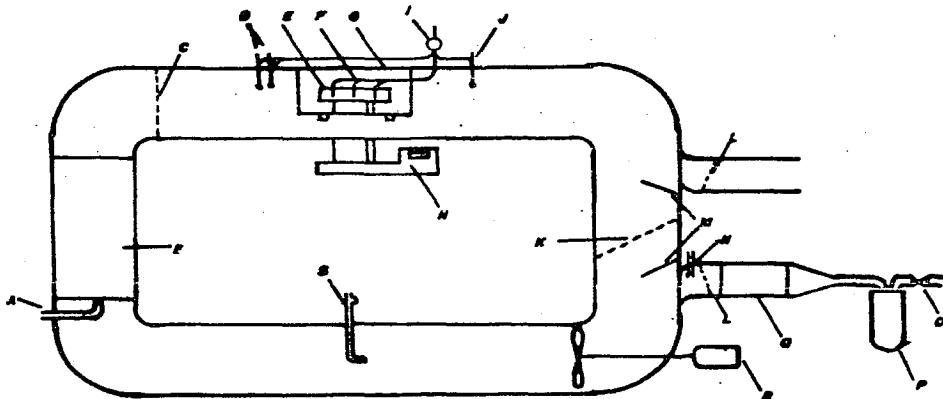
l = claro

E = Módulo de elasticidad del acero = 2 039 000 kg/cm²

I = Momento de inercia, para ángulo de acero de 3/4 pulgada = 0.37 cm⁴

Δ = Deflexión

por lo tanto:



- | | | | |
|----------|--|-------------|--|
| A | INGRESO DE VAPOR | J | MEDIDOR DE TEMPERATURA DE BULBO |
| B | CALENTADOR | K, L | VALVULAS DE MARIPOSA |
| C | MEZCLADOR | M | DEFLECTORES |
| D | MEDIDORES DE TEMPERATURA DE BULBO | N | MEDIDORES DE TEMPERATURA DE BULBO |
| | HUMEDO Y SECO | | HUMEDO Y SECO |
| E | BARDEJA | O | VALVULA DE AGUA |
| F | CABLES DE TERMOPARES | P | DENUMIFICADOR DE AIRE |
| G | VENTANA | Q | PRECALENTADOR |
| H | ESCALA | R | VENTILADOR |
| I | SELECTOR DE TEMPERATURA | S | MEDIDOR DE VELOCIDAD |

FIGURA 10
SECADOR PROPUESTO

$$\Delta \text{ máx} = \frac{154.4 \text{ kg (50 cm)}^3}{48 (2\,039\,000 \text{ kg/cm}^2) (0.37 \text{ cm}^4)} = 0.53 \text{ cm.}, \text{ por}$$

lo que el ángulo elegido es el correcto.

Para las barras que unirán los apoyos tenemos que:

$R = P = 77.2 \text{ kg}$, y $V = 0$, $M = 0$, por lo que se puede usar ángulo de $1/2$ pulg., puesto que solamente sirve para rigidizar, no carga.

Ahora, para determinar si el ángulo de $3/4$ pulgada sirve para las patas de los apoyos, se analizará a compresión, y si consideramos que la altura de dichas patas será de un metro, entonces:

Para ángulo de $3/4$ pulg.:

$$A = 1.11 \text{ cm}^2 = \text{área de la sección transversal}$$

$$I = 0.37 \text{ cm}^4 = \text{momento de inercia}$$

$$S = 0.28 \text{ cm}^3 = \text{módulo de sección}$$

$$r = 0.58 \text{ cm} = \text{radio de giro}$$

calculamos:

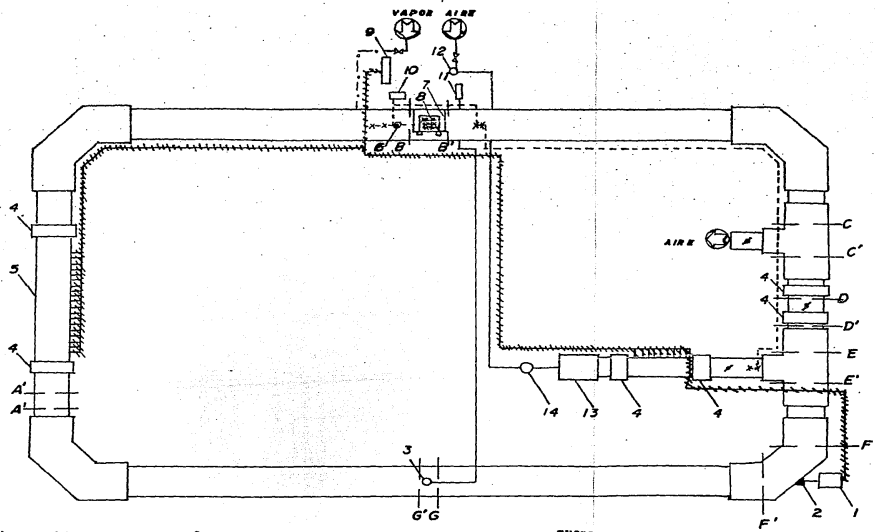
$$\frac{L}{r} = \frac{100 \text{ cm}}{0.58 \text{ cm}} = 172.4 \cong 173, \text{ para este valor la carga dis-}$$

ponible es de 350.8 kg/cm^2 , por lo que:

$W = 350.8 \text{ kg/cm}^2 \times 1.11 \text{ cm}^2 = 389.4 \text{ kg} > 77.2 \text{ kg.}$, siendo adecuada.

Para comprobar, calculamos $K \frac{L}{r}$, K (factor de longitud efectiva) para rotación libre y translación restringida en ambos extremos de la pata, tiene un valor de 1.0 por lo que:

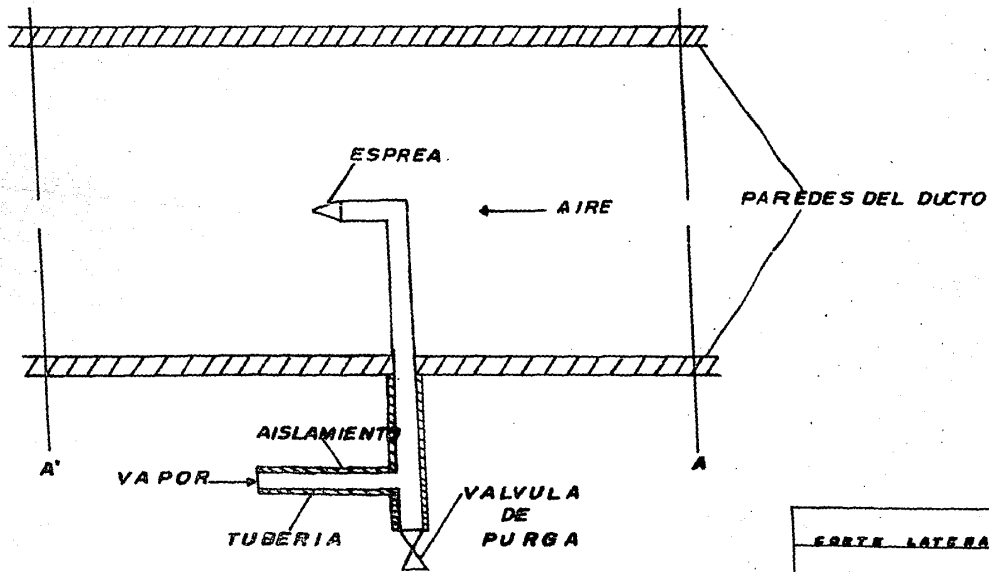
$K \frac{L}{r} = 1.0 \times 173 = 173$, como $120 < 173 < 250$ se acepta el ángulo de $3/4$ pulgada, soldado en la parte superior y anclado en la parte inferior.



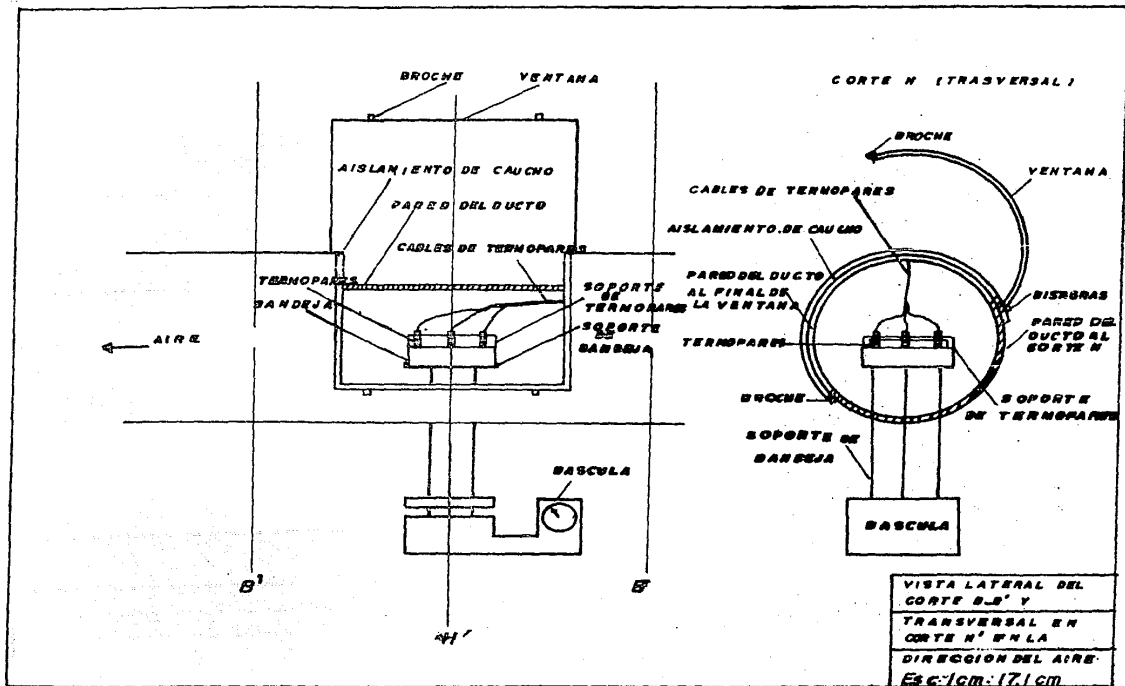
- 1.- MOTOR DE VENTILADOR
- 2.- COJINETE
- 3.- MEDIDOR DE VELOCIDAD
- 4.- JUNTA S BRADLET
- 5.- SALIDA DE CABLES DE TERMOPARES DE LA BANDEJA
- 7.- VENTANA
- 8.- BANDEJA
- 9.- CONTROL DE UNIDADES CALIPACTOMAS
- 10.- CONTROL DE LECTURAS DE TERMOPARES
- 11.- SENSOR DE VELOCIDAD
- 12.- ROTAMETRO
- 13.- REDUCCION
- 14.- DEMODIFICADOR

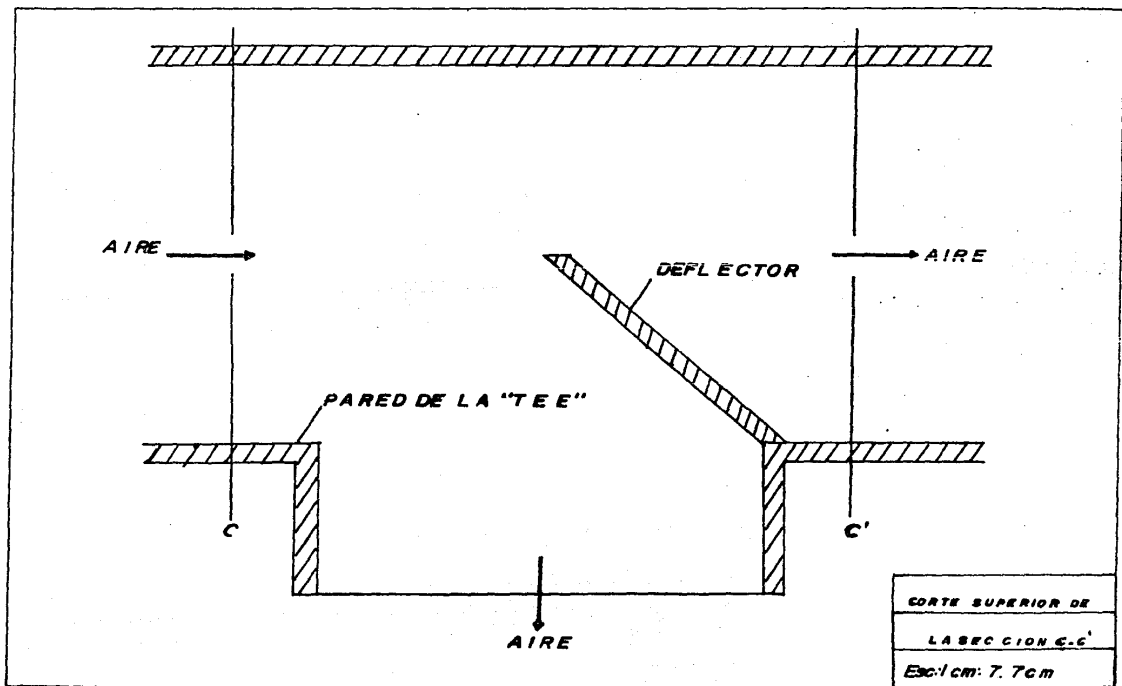
- TUBERIA
- TUBERIA DE VAPOR AISLADO
- CABLEADO ELECTRICO
- CABLEADO DE LOS TERMOPARES
- VALVULAS DE BRADPOSA
- VALVULAS DE AGUA
- TERMOPARES

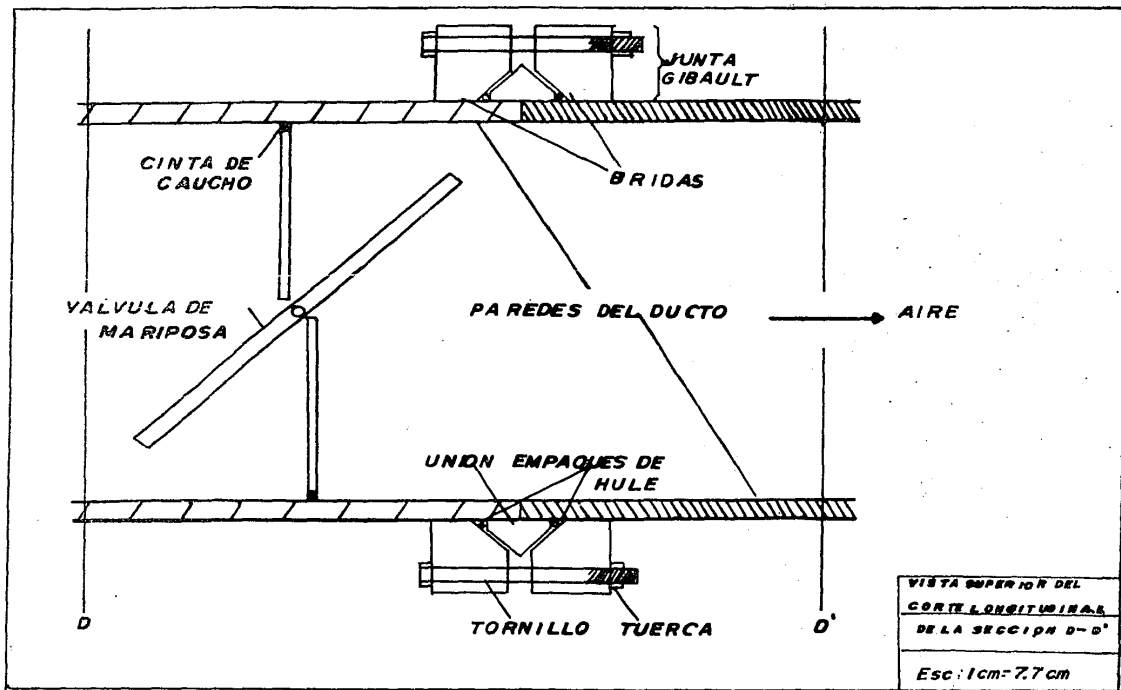
PLANO DE LA VISTA SUPERIOR
 DEL SECADOR PROPUESTO
 Esc: 1 cm : 85 cm

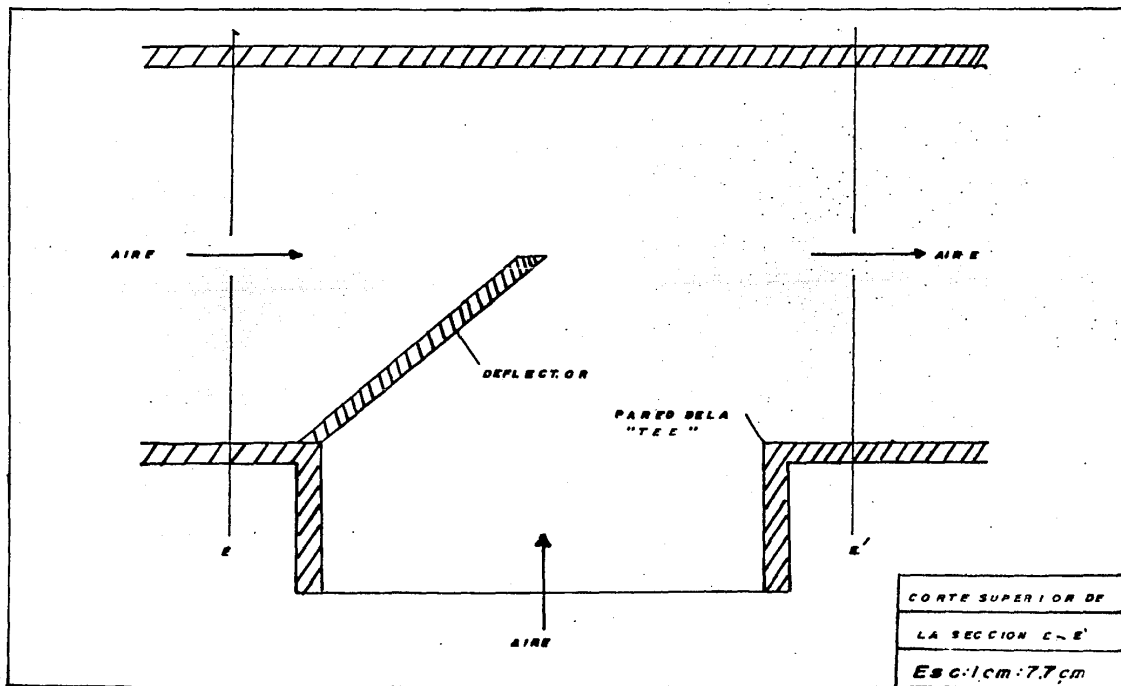


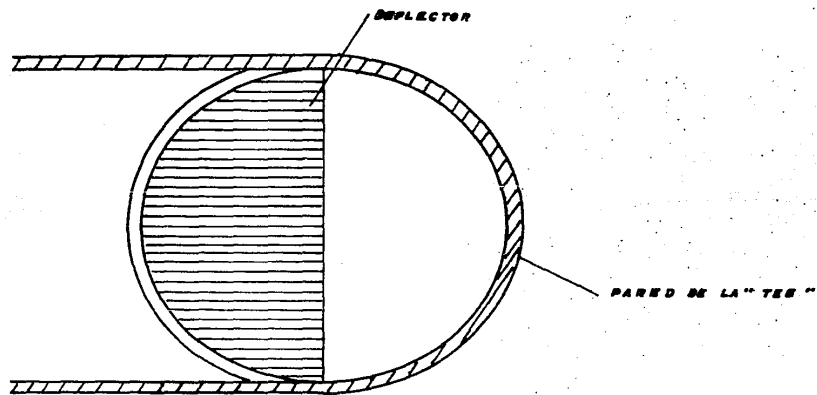
ESQUEMA LATERAL
DE LA SECCION A-A'
Esc: 1 cm = 9,6 cm





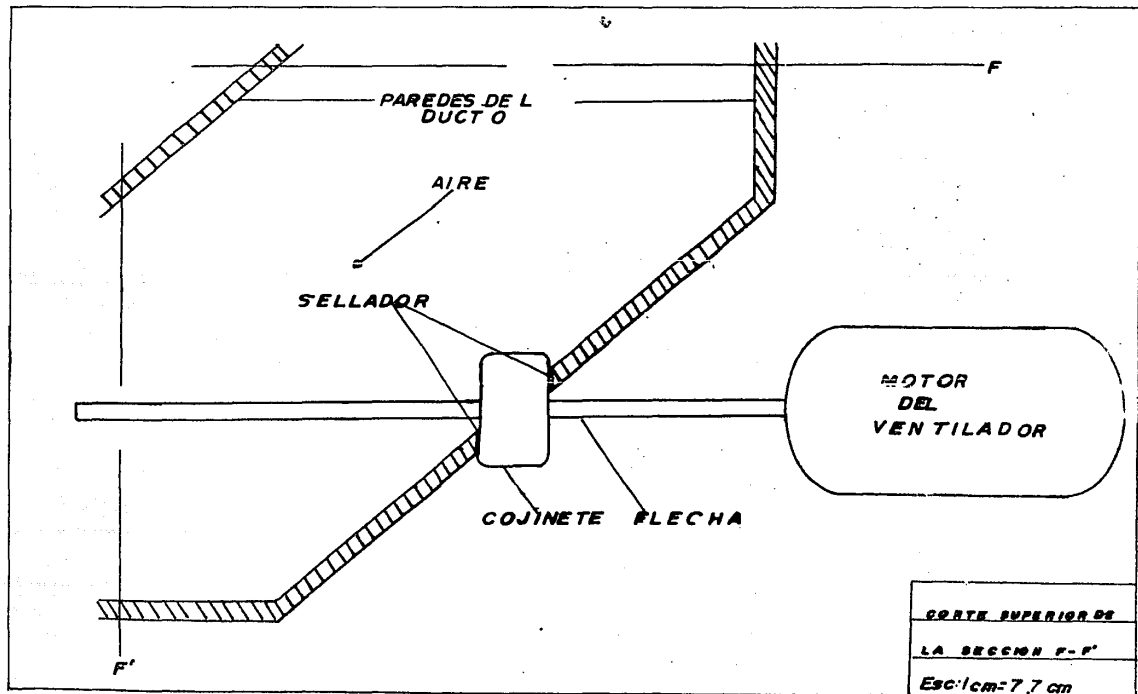


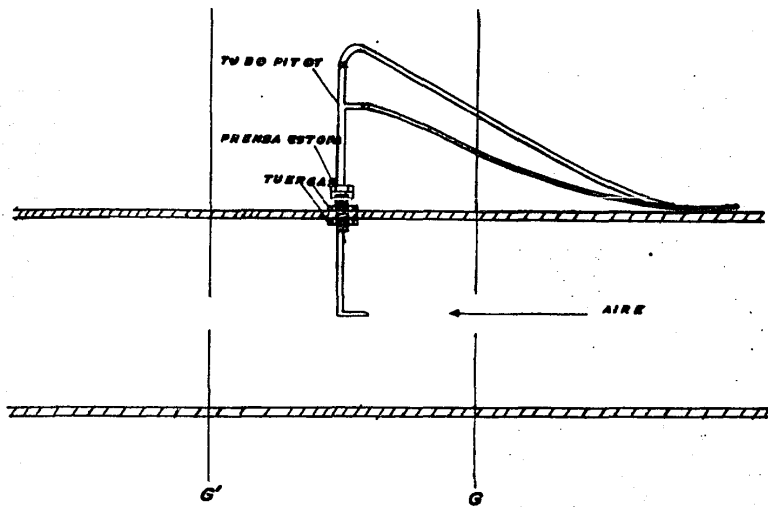




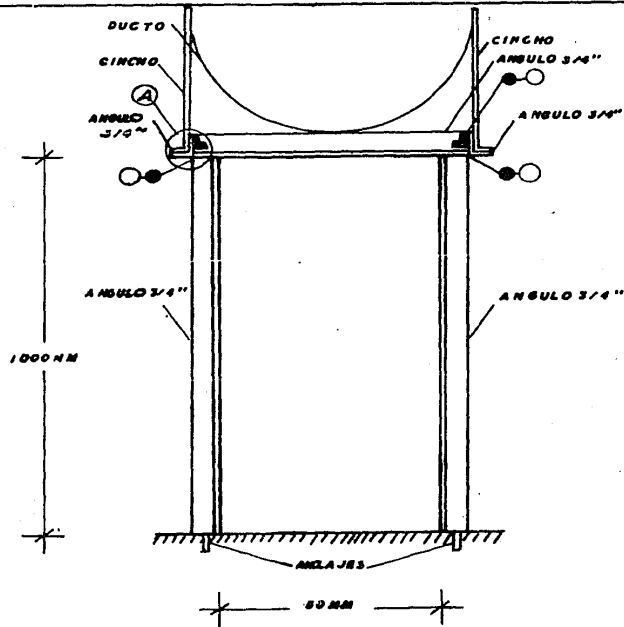
CORTE TRVERSAL
DE LAS "TEES" CON
DEFLECTOR

ESG: 1cm:0.4cm -



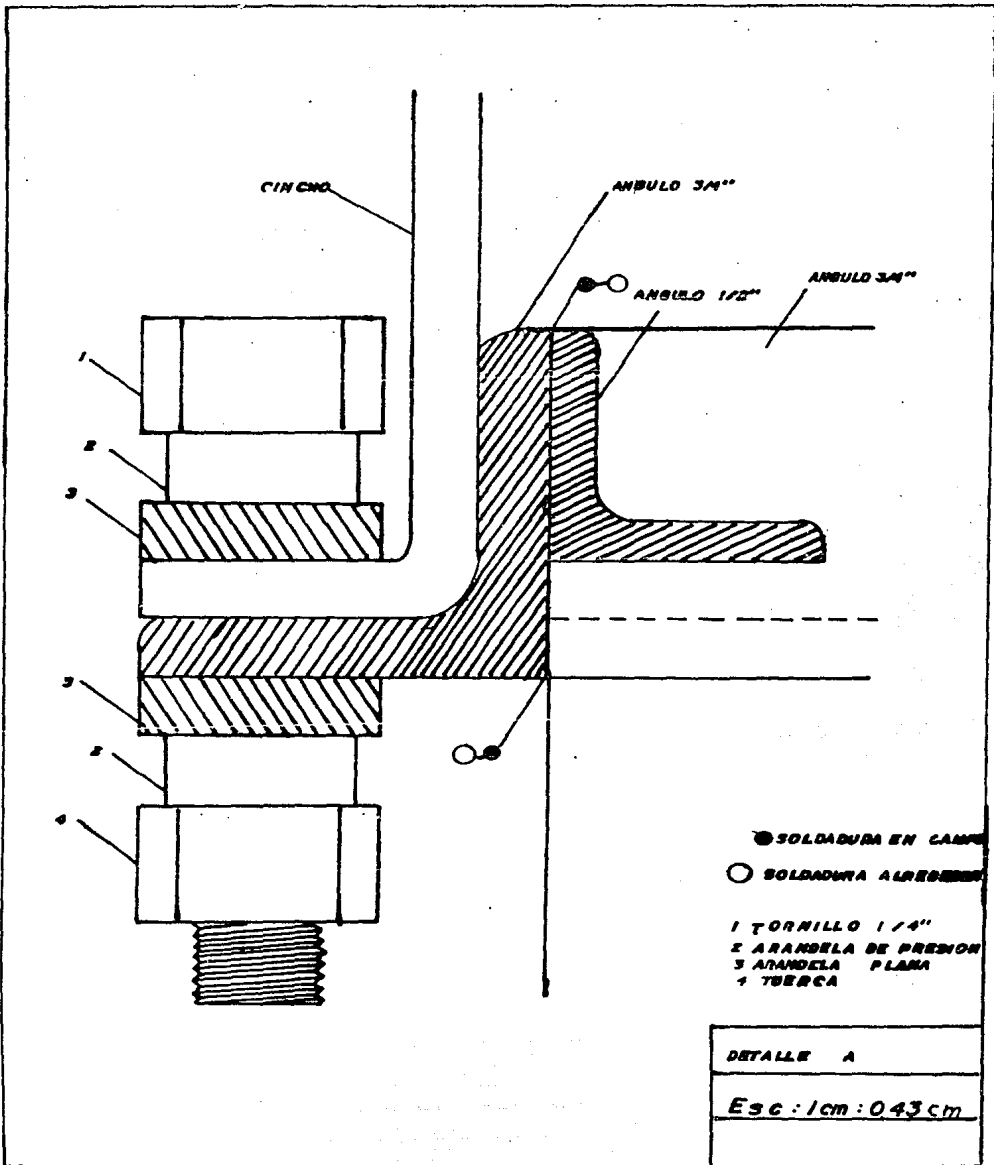


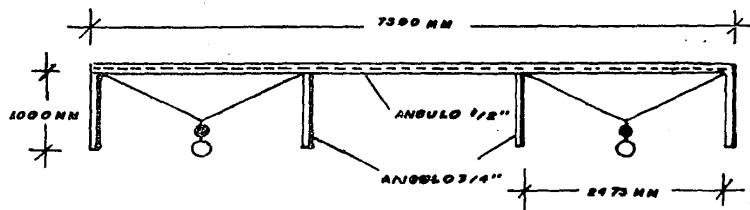
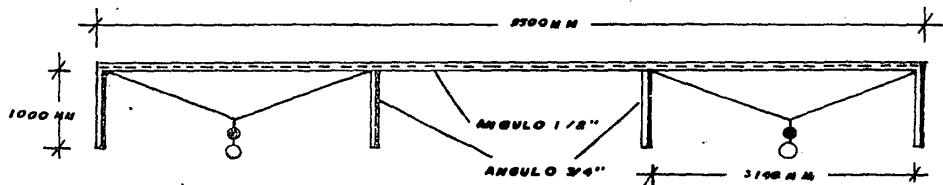
CORTE LATERAL DE
 LA SECCION G-G'
 Esc=1 cm=15.4 cm



● SOLDADURA EN CALZADO
○ SOLDADURA ALREDEDOR

FIGURA 11 SOPORTE DE
SECADO
Acot:MM



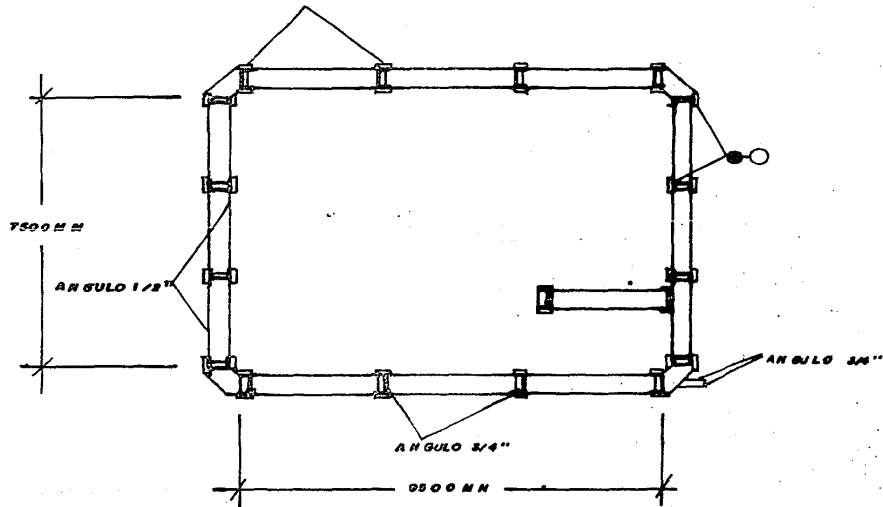


- SOLDADURA EN CAMPO
- SOLDADURA ALREDEDOR

VISTA LATERAL DE
 LAS SECCIONES
 LARGA Y CORTA
 DE LA ARMADURA

Acot: mm

ANGULOS SOLDADOS PARA SUJETAR LOS CANGROS



● SOLDADURA EN CAMPO

○ SOLDADURA ALREDEDOR

VISTA SUPERIOR DE LA
ESTRUCTURA DEL
SECADOR

Acot - M M

V.- ESTIMACION DE COSTOS.

En este capítulo se hará una evaluación del costo de todos los materiales y equipos con los que no cuenta el Laboratorio de Ingeniería Química, y, cuya consignación sería necesaria para construir el túnel de secado; además de seleccionar en base a los costos, los materiales en los que había alternativas de elección fuera de diseño.

Daremos comienzo con el listado del material y equipo con el que ya cuenta el Laboratorio.

<u>EQUIPO</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>CANTIDAD</u>
Tubo pitot completo	Pieza	1
Selector	Pieza	1
Indicador de temperaturas	Pieza	1
Balanza analítica o electrónica	Pieza	1
Termómetros	Pieza	5
Motor de velocidades variables con flecha	Pieza	1
Angulo de acero al carbón de 3/4 de pulgada (para estructura del secador)	m	50
Angulo de acero al carbón de 1/2 pulgada (para estructura del secador)	m	80
Solera de acero al carbón	m	25
Alambre de termopar tipo T - (cobre-Constantaneo)	m	15
Sellador	l	1

Ahora enlistaremos el material y equipo que se debe conseguir; se añade su costo en dólares.

<u>EQUIPO</u>	<u>MATERIAL</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>CANT.</u>	<u>COSTO UNITARIO</u>
Hélice	Acero inoxidable 316	Pieza	1	\$ 5.88
Bandeja y soportes de calefactor	Placa de asbesto	m ²	2	\$ 2.64
Ventana	Placa de acrílico	m ²	0.5	\$ 14.27
Alambre calefactor	Nicromel cal. 18	m	30	\$ 0.16

<u>EQUIPO</u>	<u>MATERIAL</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>CANT.</u>	<u>COSTO UNITARIO</u>
Termopares	Resina polyester	L	0.5	\$ 2.17
Alambre calefactor	Nicromel cal. 30	m	157	\$ 0.3

Continuamos con la lista de precios del material que qued6 a eleccion, segun su economia.

<u>EQUIPO</u>	<u>MATERIAL</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>CANT.</u>	<u>COSTO UNITARIO</u>
Ducto	Acero inoxidable 316	m	30	\$ 272.50
	Asbesto	m	30	\$ 34.83

Como se ve en la tabla anterior, el material adecuado para el ducto y sus conexiones, es el de asbesto.

Añadiendo este costo a los de la tabla anterior, encontramos la inversion aproximada que se tendria que realizar.

<u>C O N C E P T O</u>	<u>C O S T O</u>
Hélice	\$ 5.88
Bandeja (de asbesto) y soportes de calentadores	\$ 2.64
Resina Polyester	\$ 1.08
Ventana	\$ 7.13
Ducto (incluye costo de 4 codos de 90°, radio abierto y 2 "Tee" para entrada y salida de aire)	\$1,576.98
Alambre calefactor	\$ 51.90
T o t a l :	<u>\$1,645.61</u> =====

VI. - CONCLUSIONES.

Hemos visto cuales son las bases del secado, los desarrollos y experiencias referentes a secadores de laboratorio, los tipos de secadores que existen y con ello se eligió el más adecuado para la realización de prácticas e investigaciones.

Se hizo el diseño del secador y se estimó su costo, resta integrar los dos últimos capítulos e indicar como funcionaría, a lo cual pasaremos inmediatamente.

Finalmente, el secador de bandeja tipo túnel, en forma de anillo - hecho de asbesto se integra con dos tramos largos y dos cortos de ducto en línea recta, unidos por cuatro codos de radio largo de 90° , que contendrán: un ventilador de velocidad variable (con el motor fuera de túnel) (que cubrirá un rango de 125 - 1370 ft/seg.) un medidor de velocidad consistente en un tubo pitot, instalado en uno de los tramos largos del túnel; un elemento calefactor colocado en el tramo corto inmediato anterior, la bandeja con medidores de temperatura de bulbo húmedo y seco, instalados en el siguiente tramo largo, ingreso y salida de aire, así como válvula reguladora de recirculación, colocados en el último tramo corto, además, la bandeja lleva tres baterías de medidores de temperatura del material a secar; la masa se determinará con una balanza analítica o electrónica y existe una ventana para observar el desarrollo del proceso en la bandeja, por donde se cambiará la muestra y la misma bandeja.

El proceso de funcionamiento sería el siguiente:

Se hace pasar aire por el humidificador y se almacena en el precalentador hasta que se pueda pasar al túnel; una vez ahí, se arranca el ventilador con la salida del aire semiabierto, con los calefactores y detectores de temperatura y humedad trabajando. Una vez estabilizadas las condiciones del proceso, se le detiene y rápidamente se introduce la bandeja con la muestra, ajustándoseles los termopares que detectarán la temperatura de dicha muestra. Se llevan a cabo las corridas deseadas, verificando la temperatura, humedad y peso simultáneamente, prolongando el secado hasta la fase -- que se requiera, para luego compilar los datos y concluir.

Como se expuso al inicio de este trabajo, este es un secador enfocado a la investigación del secado de diversos materiales, bajo --

condiciones plenamente controladas, por lo que es importante, su existencia en el Laboratorio de Ingeniería Química, sin relegar su uso en prácticas de transferencia de energía y masa, como por ejemplo, la determinación de curvas de secado similares a las presentadas en las gráficas E, F, G, H, I y J, determinación de humedades de equilibrio; humedades libres, humedades críticas, coeficientes de transferencia de calor y, eventualmente, de masa; todo ello para la gran diversidad de materiales mencionados al inicio del capítulo IV, entre otros.

VII.- BIBLIOGRAFIA.

- (1) Balzhiser, R.E. Termodinámica química para Ingenieros. 1a. Ed. Madrid, 1974 (c.1974) 733 pp.
- (2) Carrier y Lindsay, Refrigerating Eng., 11, 241-57 (1925); Mech. Eng., 47, 327-31 (1925).
- (3) Carrier, J. Ind. eng. Chem., 13, 432-8 (1921)
- (4) Ceaglske & Hougen. Drying granular solids. University of Wisconsin Madison, Wis., U.S.A. Industrial and engineering Chemistry. 1937 Vol. 29, No. 7 pp. 805-813
- (5) Coffey y Horn. J. Am. Soc. Refrigerating Eng., 3, No. 2, 3732 (1916)
- (6) Crane. Flow of Fluids. Crane Co. NY. 1969 (c.1969) 121 pp.
- (7) Himus and Hinchley. Chemistry and industry. 43, 840-5 (1921)
- (8) Kneule, F. El Secado. "Enciclopedia de la tecnología química" tl., 1a. Ed. España, Urmo, S.A., 1976 (c.1976) 414 pp
- (9) Lapple, Clark & Dybdal. Dryign design and costs. Midwest research institute and Monsanto Chemical Co. U.S.A. Chemical engineering 1955, pp 177-
- (10) Lurie & Michailoff. Evaporation from free water surface. Industrial and engineering chemistry. U.R.S.S., 1936. Vol. 28, No. 3, pp 345-349
- (11) Nissan, Kaye & Bell, Mechanism of Drying thick porous bodies during the falling rate period. American institute chemical engineerings. The university of Leeds, Leeds England, 1959. Vol. 5, No. 1 pp 103-110
- (12) Peck, Griffith & Rao. Relative magnitudes of surface and internal resistance in drying. Illinois institute of technology, Chicago III., U.S.A. Industrial and engineering chemistry. 1952. Vol. 44 No. 3, pp 664-669
- (13) Perry. Manual del Ingeniero Químico. U.T.E.H.A., Sección 13, pp 1238-1275.
- (14) Shepherd, Hadlock & Brewer. Drying material in trays. E. I. du Pont de Nemours & Company, Wilmington, Del., U.S.A. Industrial and engineering chemistry. Vol. 30, No. 4 pp 388-397
- (15) Thisenhusen. Gesundh - Ing. 53,113 (1930)
- (16) Treybal, R.E. Mass transfer operations. 2a. Ed. Japón, 1968 (c. 1955) II + 717 pp.

- (17) Van der Merwe, Carel W. Física general. México, 1970
(c. 1969) 276 pp.
- (18) Varics. Internatinal critical tables. pp 67-68
- (19) Altos Hornos de México. Compendio del manual AHMSA, construcción del acero. 1977.
- (20) Compañía fundidora de Fierro y Acero Monterrey. Manual Monterrey.