

2eji 45



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

OPTIMIZACION DE UN SECADOR  
DE AIRE DIRECTO

T E S I S

Medardo Juan León Vásquez

INGENIERO QUIMICO



1987



## **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 N D I C E

	PAG.
<b>OBJETIVO</b> .....	1
<b>RESUMEN</b> .....	2
 <b>CAPITULO I.</b>	
<b>Secado</b> .....	7
<b>I.1 Definición del Secado</b> .....	7
<b>I.2 Condiciones que afectan el secado</b> .....	7
<b>I.3 Periodos de secado</b> .....	8
<b>I.3.1 Periodo de velocidad de secado constante.</b>	12
<b>I.3.2 Período de caída de la velocidad de seca-</b>	
<b>do</b> .....	16
<b>a) Secado de superficie insaturada</b> .....	16
<b>b) Secado controlado por el movimiento de</b>	
<b>la humedad interna</b> .....	17
<b>1) Control por difusión del líquido</b> .....	17
<b>2) Control por flujo capilar</b> .....	18
<b>I.4 Humedad de equilibrio</b> .....	20
 <b>CAPITULO II.</b>	
<b>Carta Psicrométrica</b> .....	21
<b>1.- Humedad absoluta</b> .....	22
<b>2.- Humedad relativa</b> .....	22

	PAG.
3.- Temperatura de saturación adiabática .....	23
4.- Temperatura de bulbo húmedo .....	28
5.- Volumen húmedo .....	35
6.- Calor húmedo .....	35
7.- Entalpía .....	36
8.- Medición de la humedad .....	37
 <b>CAPITULO III.</b>	
Estado actual del secador .....	39
III.1 Generalidades sobre un secador de aire di- recto .....	39
III.2 Descripción del estado del secador .....	43
Paredes .....	44
Ventiladores .....	45
Cambiador de calor .....	45
Instrumentación y accesorios .....	46
Registrador de temperatura .....	47
Válvula termorreguladora .....	47
Trampa de vapor .....	47
Carros Portacharolas .....	47
Charolas .....	47
Mamparas .....	47
Flujo de aire de secado .....	48

	PAG.
Aire húmedo de salida y fresco de entrada.	51
<b>III.3 Pruebas de secado</b> .....	<b>53</b>
a) Experimentación .....	53
b) Análisis de las curvas de secado .....	67
1) Charola 1 en mal estado .....	67
2) Charola 1 en buen estado .....	69
3) Charola 2 en mal estado .....	71
4) Charola 2 en buen estado .....	72
c) Eficiencia .....	73
d) Análisis económico del secado .....	76
 <b>CAPITULO IV.</b>	
<b>Optimización del secador</b> .....	<b>78</b>
<b>IV.1 Rediseño del secador</b> .....	<b>78</b>
a) Area libre de circulación de aire .....	78
b) Ductos de entrada a los ventiladores ..	80
c) Mamparas de las esquinas superiores ...	80
d) Mamparas que dirigen el aire hacia cha- rolas .....	83
e) Inversión de la dirección del flujo de aire .....	85

	PAG.
f) Flujo volumétrico del aire .....	85
g) Entradas de aire fresco .....	86
h) Chimenea .....	91
<b>IV.2 Pruebas de secado .....</b>	<b>92</b>
a) Experimentación .....	92
b) Análisis de las curvas de secado .....	102
1) Comparación del secado con el del equipo sin optimizar .....	102
2) Comparación del secado en el equipo optimizado .....	105
c) Análisis económico del secado .....	110
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>117</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>118</b>

## O B J E T I V O

El objetivo de este trabajo es la optimización de un secador de aire directo en base a la teoría de secado.

Este equipo se encuentra en mal estado por un pobre mantenimiento y sobre todo por el tiempo de vida que tiene: más de 20 años.

El diseño de sus diferentes componentes está en la obsolescencia, y esto provoca altos tiempos de secado.

Para lograrlo se efectuó el siguiente proceso:

- 1) Evaluar sus componentes útiles
- 2) Los componentes obsoletos retirarlos y diseñar nuevos.
- 3) Diseñar componentes faltantes.
- 4) Reparar los componentes útiles dañados.
- 5) Implementar el equipo de acuerdo a lo diseñado.
- 6) Hacer pruebas para obtener las condiciones óptimas de secado a menor costo.

## R E S U M E N

La optimización del Secador de Aire Directo se apoyó en la teoría de secado, y en la carta psicrométrica construída para el sistema aire-vapor de agua.

Un secador de aire directo consta de un compartimento de tamaño variable en el que se introduce el sólido depositado en charolas que se pueden instalar directamente en niveles o colocarse primero en carros portacharolas y entonces introducirse para secar.

El aire usado se le calienta antes por medio de un intercambiador para posteriormente entrar en contacto con el producto húmedo, saliendo después del equipo saturado o con un alto contenido de humedad.

Para obtener un secado eficiente se requiere que el aire circule lo más homogéneamente posible y que las charolas contengan el producto lo mejor distribuído tanto en espesor como en separación. La velocidad del aire recomendada para lograr óptimos coeficientes de transferencia de calor es de 200 a 2000 ft/min. Del total de ai-

re que circula dentro del secador se recircula del 90-95 %, requiriéndose así calentar solo la pequeña cantidad que entra.

Las partes constituyentes del secador se pueden resumir en: cuarto de secado, ventiladores, cambiador de calor, instrumentación y accesorios básicos para el buen funcionamiento, mamparas, carros portacharolas y charolas.

Antes del rediseño las velocidades del aire dentro del secador eran muy heterogéneas incluso en puntos cercanos; la más baja fué de 0.0 y la más alta de 800 ft/min. Esto provocaba un secado muy disparejo y de larga duración. En las pruebas realizadas antes de rediseñar y modificar el equipo, el tiempo de secado fué de 46 hr donde se usó charolas en mal estado y de 34 hr donde se usó charolas en buen estado. Las curvas obtenidas tuvieron mucha desviación con respecto a las teóricas, debido al funcionamiento defectuoso y la consecuente baja eficiencia: largo tiempo de secado, alto gasto de calor y de costo por cada lote.

Se analizó y determinó que las partes que no reque-

rían modificación eran: cambiador de calor, instrumentación y accesorios, carros portacharolas, charolas y ventiladores.

Las charolas en mal estado se repararon.

Se realizaron los siguientes cambios:

- 1) Se eliminó el área libre que existía al paso del aire obligando que éste circulara en la zona de charolas.
- 2) Se instalaron ductos de entrada a los ventiladores para evitar una caída alta de presión.
- 3) Se diseñaron mamparas para las esquinas superiores y para dirigir el aire hacia las charolas. Estas crean un flujo homogéneo.
- 4) Se rediseñaron la chimenea y entradas de aire fresco y se reubicaron. La chimenea quedó en el techo al centro del secador antes del cambiador de calor y las entradas de aire fresco antes de los ventiladores.

- 5) La dirección del flujo de aire se estableció a  
contra manecillas del reloj (visto el secador  
desde la puerta).

Después de realizar los cambios mencionados, las va-  
riaciones de velocidad del aire dentro del secador fueron  
de 240 a 460 ft/min lo cual muestra que el flujo se hi-  
zo más homogéneo.

Se efectuaron pruebas de secado con diferentes can-  
tidades de aire fresco (as) obteniéndose los siguientes  
tiempos y calor gastado por lote:

- a) Con 9.7 Kg as/min, secado en 21.5 hr con  
4,213,000.0 BTU
- b) Con 17.3 Kg as/min, secado en 18.5 hr con  
4,460,000.0 BTU
- c) Con 24.8 Kg as/min, secado en 18.5 hr con  
4,942,500.0 BTU
- d) Con 37.2 Kg as/min, secado en 20.9 hr con  
6,084,000 BTU

La cantidad de aire fresco que usaba el equipo en

su estado original era de 24.2 Kg/min con un tiempo de secado de 46 hr y un gasto de calor de 9,272,600.0 BTU.

De acuerdo al análisis económico, la cantidad de ai re fresco de menor costo fue la de 9.7 Kg as/min con un costo de \$16,176.00/lote, que comparado con el del equipo original, \$35,518.00/lote, se obtuvo un ahorro de \$19,342.00 que corresponde a un mejoramiento de 119.6%. El ahorro en tiempo fué de 24.5 hr que corresponde a un mejoramiento de 113.9%.

## CAPITULO I

### SECADO

#### I.1 Definición del Secado.

El secado es el proceso de separación física de un líquido contenido en un sólido por medio de evaporación, usando para esto energía térmica.

El mecanismo de secado es controlado por los principios de transferencia de calor y masa que consisten en el transporte del líquido desde el interior del sólido a la superficie, la evaporación de éste desde la superficie del sólido y el paso del vapor a la fase gaseosa.

Simultáneamente a los pasos anteriores hay una transferencia de calor de la fase gaseosa a la sólida, que proporciona el calor sensible necesario para la evaporación del líquido.

#### I.2 Condiciones que afectan el secado.

La velocidad de la evaporación depende de las condiciones externas presentes, tales como: humedad, temperatura y flujo del gas circulante. También de la forma, tamaño y humedad del sólido, tipo de agitación, forma de

contacto entre medio de calentamiento y el sólido húmedo. Durante la evaporación aparecen los llamados mecanismos internos debido a los movimientos del líquido dentro del sólido, creados por gradientes de concentración. Estos dependen de las características del sólido.

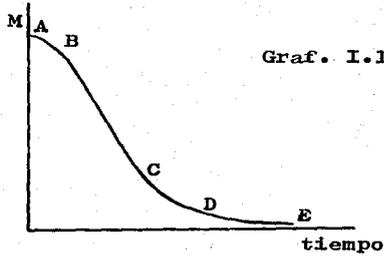
Estos mecanismos internos son: difusión del líquido, flujo capilar, difusión del vapor y presión del sólido.

### I.3 Periodos de secado.

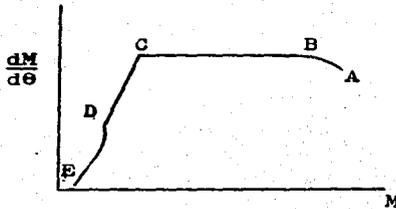
Al graficar el contenido de humedad base seca  $M$  contra el tiempo de secado  $\theta$  de un sólido, se obtiene la gráfica I.1. Se observa que al principio la caída de humedad es muy rápida, después disminuye y ya cerca del final del secado, es muy lenta.

El contenido de humedad base seca ( $M$ ) es la masa de líquido o humedad contenida en el sólido seco en Kg. de humedad/ Kg. de sólido seco. Se abreviará sólido seco como ss, en adelante.

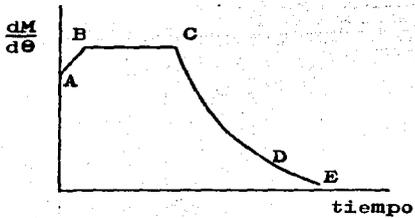
Si graficamos la velocidad de secado  $dM/d\theta$  Kg humedad en base a los datos de la gráfica I.1 contra Kg s s hr el contenido de humedad base seca y contra el tiempo de secado, se obtienen las gráficas I.2 y I.3 donde aparecen claramente las diferentes etapas de secado.



Graf. I.1.- Tiempo contra contenido de humedad base seca (M)



Graf. I.2.- Contenido de humedad base seca contra velocidad de secado ( $\frac{dM}{d\theta}$ )



Graf. I.3.- Tiempo contra velocidad de secado.

Al principio del secado el sólido y el líquido se calientan hasta alcanzar la temperatura de equilibrio; mientras ésto sucede, la velocidad de secado aumenta como lo indica la curva A B.

La velocidad de secado se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\frac{dM}{dt} = k (H_s - H) \quad (I.1)$$

$H_s$  es la humedad de saturación del gas y  $H$  es la humedad del gas de secado circulante, ambos expresados en kg. de humedad / kg de gas seco;  $k$  es el coeficiente de transferencia de masa en kg evaporados /hr (diferencia de humedad).

En la parte BC de la curva, la velocidad de flujo de calor del gas circulante hacia la superficie del líquido iguala la velocidad de evaporación de este último, y en los intersticios y capilares del sólido aparece un flujo de líquido hacia la superficie que es tan rápido como se efectúa la evaporación. En tales condiciones la velocidad de secado y la humedad del gas permanecen constantes y la superficie húmeda del sólido alcanza una temperatura de equilibrio. En la ec. I.1  $k$  permanecerá constante.

Este periodo llega a su fin en el punto C.

La humedad presente en el sólido en este punto se le llama humedad crítica, la cual es diferente para cada sólido, y es variable dependiendo de las condiciones en que se efectuó el secado. Su valor depende de la velocidad de secado, el espesor del material y factores que influyen el movimiento de la humedad dentro del sólido.

Al periodo comprendido entre los puntos BC se llama de velocidad de secado constante. En seguida aparece el periodo de caída de velocidad de secado (parte CE). En el punto C el líquido en la superficie del sólido se ha evaporado a tal grado que aparecen partes secas que crecen cada vez más hasta que la película del líquido en la superficie se evapora totalmente (superficie insaturada), alcanzándose el punto D.

El trayecto CD es llamado periodo de secado de superficie insaturada y constituye la primera parte del periodo de caída de velocidad de secado. Esta parte de la curva podría no existir o constituir el total de este periodo.

A partir del punto D la velocidad de secado es controlada por el movimiento interno de la humedad debido a gradientes de concentración. Conforme baja la concentra-

ción, la velocidad del movimiento interno baja y el secado cae más desde punto D hasta E.

Una vez que se llegó al punto E, se alcanza el equilibrio entre la humedad del sólido y la del gas presente, y el secado se detiene.

### I.3.1 Periodo de velocidad de secado constante.

En este periodo el movimiento de la humedad no enlazada desde dentro del sólido hasta la superficie es tan rápida que la superficie se mantiene saturada.

La humedad no enlazada es aquella que en un sólido se presenta en tal cantidad que muestra una presión de vapor igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

La velocidad de secado es controlada por la velocidad de transferencia de calor desde el gas circulante a la del sólido húmedo que a su vez es igual a la velocidad de transferencia de masa desde el sólido al gas circulante.

Si consideramos una charola conteniendo un sólido húmedo en un medio con flujo de aire, observamos que la superficie del sólido recibe calor de varias formas:

a) Por convección desde el gas, dado por:

$$q_c = h_c (t_G - t_s) \quad (I.2)$$

b) Por radiación desde cualquier superficie a  $t_r$ , dado por

$$q_r = h_r (t_r - t_s) \quad (I.3)$$

c) Por conducción a través del sólido y la charola. Aquí se involucra la convección por el lado exterior de la charola, usándose mejor el coeficiente total  $U_k$  para charola y sólido

$$q_k = U_k (t_G - t_s) \quad (I.4)$$

$h_c$  = coeficiente de transferencia de calor por convección

$h_r$  = coeficiente de transferencia de calor por radiación

$t_G$  = temperatura del gas

$t_s$  = temperatura del sólido

$t_r$  = temperatura de la superficie radiante.

$U_k$  = coeficiente de transferencia de calor total

Donde las dimensiones de los coeficientes de transferencia de calor son:

energía/ (tiempo) (temperatura) (Area)

El calor total que recibe la superficie del sólido es

$$q_t = q_c + q_r + q_k \quad (I.5)$$

Si consideramos que el calor se aprovecha sólo para la evaporación, el flux de vaporización  $V_s$  se relaciona con el flux de calor por la ecuación

$$q = V_s \lambda \quad (I.6)$$

Sustituyendo ecs. I.2 a I.4 en I.5 e igualando con I.6 se obtiene:

$$V_s = \frac{(hc + Uk)(t_G - ts) + hr (tr - ts)}{\lambda} \quad (I.7)$$

Por otro lado

$$V_s = k_y (H_s - H) \quad (I.8)$$

$k_y$  = coeficiente de transferencia de masa fase gas en masa evaporada / (area) (tiempo) (diferencia de humedad)

$\lambda$  = calor latente de vaporización.

Ec. (I.7) indica que la velocidad de transferencia de masa es igual a la velocidad de transferencia de calor.

Combinando ecs. (I.7) y (I.8) se obtiene

$$\frac{(H_s - H)\lambda}{h_c/k_y} \left(1 + \frac{Uk}{h_c}\right) (t_G - ts) + \frac{hr}{h_c} (tr - ts) \quad (I.9)$$

Si la transferencia de calor se efectúa sólo por convección ec. (I.9) se convierte en la de temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de la superficie  $t_s$  se aproxima a ésta.

Si existe radiación o conducción junto con convección, la temperatura de la superficie saturada del sólido está entre la de bulbo húmedo y la de ebullición del agua, obteniéndose así una mayor velocidad de secado.

Cuando existe conducción y la convección es despreciable, la temperatura de la superficie del sólido tiende a la de ebullición del líquido.

Cuando el sólido a secar se encuentra en charolas colocadas unas sobre otras, como en el caso del secador de aire directo, el calor transferido por radiación será despreciable si la temperatura del gas no es muy alta; de otra manera la temperatura de la superficie del sólido tenderá a ser mayor a la de bulbo húmedo, aumentando así la velocidad de secado.

La evaporación en el periodo de secado de velocidad constante es similar a la evaporación de una superficie de agua y es independiente de la naturaleza del sólido.

En este periodo las variables importantes son la velocidad del gas, su estado termodinámico, sus propiedades de transporte y el estado de agregación del sólido. Los cambios en la temperatura, humedad y flujo del gas tienen un fuerte efecto en este periodo.

Siempre es deseable alargar tanto como sea posible el periodo de velocidad constante, pues es más costoso quitar un cierto peso de humedad de un sólido en el periodo de caída de humedad.

Una forma de lograrlo es aumentar el área de secado reduciendo el tamaño de partícula o dejando el espesor de éste al mínimo.

### I.3.2 Periodo de caída de la velocidad de secado.

En este periodo los factores importantes son la temperatura y las propiedades de transporte del sólido, generalmente se divide en dos partes:

- a) Secado de superficie insaturada (parte CD)
- b) Secado controlado por el movimiento de la humedad interna (parte DE)

#### a) Secado de superficie insaturada

Después del periodo de velocidad constante ya no queda suficiente humedad para que la superficie del sólido permanezca saturada y la velocidad del secado disminuye; sin embargo esta velocidad depende de factores que afectan la difusión de la humedad desde la superficie del sólido y la velocidad del movimiento interno de ésta.

La ecuación que nos define la velocidad de secado de superficie insaturada es la siguiente

$$-\frac{dM}{d\theta} = \frac{k_y A (M - M_e) (H_s - H)}{W (M_c - M_e)} \quad (I.10)$$

M= Contenido de humedad base seca del sólido a un cierto tiempo.

Me= Contenido de humedad de equilibrio del sólido

Mc= Contenido de humedad crítica del sólido.

W= Peso del sólido a secar.

A= Area expuesta a la evaporación.

b) Secado controlado por el movimiento de la humedad interna.

Esta se subdivide en dos tipos:

1) Control por difusión del líquido.

2) Control por flujo capilar.

1) Control por difusión del líquido.- Aparece por gradientes de concentración al producirse la evaporación en la superficie.

Posterior al periodo de evaporación de superficie insaturada, el secado es controlado completamente por la velocidad de difusión que es pequeña a bajos contenidos de humedad.

La ecuación que se aplica en este periodo es:

$$\frac{M - M_e}{M_c - M_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D\theta \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2} \quad (\text{I.11})$$

$\theta$  = Tiempo de secado transcurrido del periodo de caída de velocidad (hr)

D = Difusividad del líquido (ft<sup>2</sup>/hr)

M = Está expresado en lb

$d =$  espesor del sólido (ft)

Esta ecuación se aplica a una porción de sólido cuyo espesor es pequeño comparado con las demás dimensiones, asumiendo que tiene su superficie seca o en su humedad de equilibrio y para tiempos largos de secado.

Diferenciando ec. (I.11) se obtiene la velocidad de secado.

$$\frac{dM}{d\theta} = - \frac{\pi^2 D}{4 d^2} (M - M_e) \quad (\text{I.12})$$

Se observa que la velocidad de secado es directamente proporcional a la humedad libre del sólido e inversamente proporcional al cuadrado del espesor del sólido.

Esta ecuación se aplica cuando al graficar el

$$\log \left[ \frac{(M - M_e)}{(M_c - M_e)} \right] \text{ vs } \theta$$

se obtiene una recta y cuando los valores de

$$(M - M_e) / (M_c - M_e) \text{ son menores a } 0.6$$

## 2) Control por flujo capilar

Se efectúa en presencia de poros que son conductos existentes en la aglomeración de partículas esféricas.

Este tipo puede realizarse durante todo el secado.

Cuando el secado se está efectuando, la humedad se desplaza a través de los poros debido a tensión superficial y gravedad hasta alcanzar la superficie.

Conforme la humedad se desplaza desde el interior del sólido hasta la superficie y se evapora, la curvatura del menisco del líquido en los poros se incrementa y se crea una presión de succión, la cual al alcanzar cierto valor, crea succión en el poro y la humedad se desplaza desde el interior del sólido hasta la superficie.

El secado en la parte BC de la curva se hace con un incremento gradual de la succión potencial mientras se van abriendo los poros más grandes. En la parte CD hay un incremento de la succión potencial mientras la humedad decrece y los poros más pequeños se abren. En la parte DE la humedad se desplaza por difusión del vapor desde dentro del sólido.

La ecuación de velocidad de secado para flujo capilar es:

$$\frac{dM}{d\theta} = - \frac{U_k (t_g - t_s) (M - M_e)}{\rho_s \lambda (M_c - M_e)} \quad (I.13)$$

$\rho_s$  = Densidad del sólido seco.

En ecuación (I.13) se observa que el secado es inversamente proporcional al espesor del sólido.

El mecanismo de flujo capilar se aplica a sólidos porosos y granulares como arena, arcilla, pigmentos, polvos finos, minerales, etc.

#### I.4 Humedad de Equilibrio.

Una vez que el secado concluyó, el sólido queda con una humedad mínima característica llamada humedad de equilibrio.

Esta humedad tiene las siguientes características:

- 1) Puede estar absorbida en forma de película en la superficie o condensada en los capilares
- 2) Depende de las condiciones existentes como humedad y temperatura del gas y naturaleza del sólido.
- 3) A bajas temperaturas, aproximadamente entre 60 y 120°F, es dependiente sólo de la humedad relativa del gas.
- 4) A cero humedad del gas es cero en todos los materiales.
- 5) Para sólidos no porosos o no higroscópicos es esencialmente cero en todas las humedades y temperaturas del aire.

Cuando un sólido se seca a una humedad menor a la humedad de equilibrio que tiene a las condiciones de humedad y temperatura del gas, el sólido tien de posteriormente a absorber humedad hasta llegar al equilibrio, a menos que se le proteja lo suficiente.

#### I.4 Humedad de Equilibrio.

Una vez que el secado concluyó, el sólido queda con una humedad mínima característica llamada humedad de equilibrio.

Esta humedad tiene las siguientes características:

- 1) Puede estar absorbida en forma de película en la superficie o condensada en los capilares
- 2) Depende de las condiciones existentes como humedad y temperatura del gas y naturaleza del sólido.
- 3) A bajas temperaturas, aproximadamente entre 60 y 120°F, es dependiente sólo de la humedad relativa del gas.
- 4) A cero humedad del gas es cero en todos los materiales.
- 5) Para sólidos no porosos o no higroscópicos es esencialmente cero en todas las humedades y temperaturas del aire.

Cuando un sólido se seca a una humedad menor a la humedad de equilibrio que tiene a las condiciones de humedad y temperatura del gas, el sólido tiende de posteriormente a absorber humedad hasta llegar al equilibrio, a menos que se le proteja lo suficiente.

## CAPITULO II

### CARTA PSICROMETRICA

En el capítulo anterior nos referimos al comportamiento que presenta un sólido durante el secado; sin embargo, también es necesario considerar las propiedades y comportamiento del gas de secado que en el presente caso es aire-vapor de agua al que se va a transferir humedad desde su valor ambiental inicial hasta casi la saturación.

El comportamiento está dado por ecuaciones, las cuales se pueden graficar y relacionar por medio de la carta psicrométrica, y las propiedades pertinentes del gas que son:

- 1) Humedad absoluta.
- 2) Humedad relativa.
- 3) Temperatura de saturación adiabática.
- 4) Temperatura de bulbo húmedo.
- 5) Volumen húmedo.
- 6) Calor húmedo.
- 7) Entalpia

En seguida se describen éstas, así como el procedimiento de cálculo para obtener la carta psicrométrica para el sistema aire-vapor de agua a la presión de Toluca,

Edo. de México, lugar donde se elaboró esta tesis.

1. Humedad absoluta.- Es la masa de humedad en forma de vapor presente en el gas, que se expresa en masa de humedad/masa de gas seco. La ecuación que la define considerando gases ideales es:

$$H = \frac{M_v}{M_g} \cdot \frac{p}{P-p} \quad (\text{II.1})$$

$M_v$ = Peso molecular del vapor

$M_g$ = Peso molecular del gas

$p$ = Presión parcial del vapor a la temperatura existente

$P$ = Presión total del medio.

Cuando el gas alcanza la máxima humedad posible se dice que está saturado, y en ese caso la presión parcial del vapor en el gas es igual a la presión de vapor del líquido puro ( $p_s$ ) y el gas tiene la humedad de saturación ( $H_s$ ).

2. Humedad relativa.- Es el porcentaje de la presión de vapor de la humedad en el gas relativa a la del líquido puro y se describe por:

$$H_r = \frac{p}{p_s} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

Combinando ecs. (II.1) y (II.2) se obtiene la expresión para la humedad absoluta en función de humedades relativas.

$$H = \frac{M_v}{M_g} \left[ \frac{(H_r/100) \times p_s}{P - (H_r/100) \times p_s} \right] \quad (II.3)$$

En seguida se ejemplifica el uso de esta ecuación

Presión atmosférica de Toluca 557.8 mm Hg (10.78 psia)

Peso molecular del agua 18.015 lb/lbmol

Peso molecular promedio del aire 28.970 lb/lbmol

Temperatura inicial seleccionada 50°F

Presión del vapor de agua a 50°F 0.17796 psia

Humedad relativa inicial seleccionada 90%

$$H = \frac{18.015}{28.970} \left[ \frac{(90/100) \times 0.17796}{10.786 - (90/100) \times 0.17796} \right] = 0.00937$$

En la tabla II.1 se muestran las humedades absolutas para humedades relativas desde 3 a 90% y temperaturas desde 50 a 250°F. Estos resultados se grafican en la carta psicrométrica.

3. Temperatura de saturación adiabática.- Una operación es adiabática cuando no existe intercambio de calor del sistema con los alrededores.

Tabla II.1 Humedades absolutas para la mezcla aire-vapor de agua a diferentes humedades relativas para una presión atmosférica de 557.8 mm Hg (Toluca, Edo. de México)

T	Presión de vapor del agua	Hs	90%	80%	70%	60%
°F	psia					
50	0.17796	0.01043	0.00937	0.00831	0.00726	0.00621
60	0.25611	0.01512	0.01357	0.01204	0.01051	0.00898
70	0.36292	0.02165	0.01941	0.01720	0.01499	0.01281
80	0.50683	0.03066	0.02745	0.02428	0.02114	0.01804
90	0.69813	0.04303	0.03846	0.03395	0.02951	0.02512
100	0.94294	0.05957	0.05310	0.04676	0.04053	0.03442
110	1.275	0.08336	0.07403	0.06494	0.05609	0.04747
120	1.6927	0.11575	0.10227	0.08928	0.07674	0.06464
130	2.223	0.16143	0.14161	0.12277	0.10483	0.08774
140	2.8892	0.22751	0.19753	0.16960	0.14350	0.11908
150	3.7184	0.3271	0.27970	0.23681	0.19779	0.16216
160	4.7414	0.48777	0.40706	0.33730	0.27639	0.22276
170	5.9926					0.31095
180	7.511					
190	9.34					
200	11.526					
210	14.123					
220	17.186					
230	20.779					
240	24.968					
250	29.825					

T °F	50%	40%	30%	25%	20%
50	0.00517	0.00413	0.00309	0.00257	0.00206
60	0.00747	0.00596	0.00446	0.00371	0.00297
70	0.01064	0.008483	0.00634	0.00527	0.00421
80	0.01496	0.01191	0.00889	0.00739	0.00589
90	0.02079	0.01653	0.01231	0.01023	0.00815
100	0.02842	0.02253	0.01675	0.01389	0.011066
110	0.03906	0.03086	0.02286	0.01894	0.01506
120	0.05294	0.04165	0.03072	0.02539	0.02015
130	0.07144	0.05587	0.04098	0.03378	0.02673
140	0.09616	0.07462	0.05433	0.04963	0.03520
150	0.12951	0.099466	0.07173	0.05865	0.04605
160	0.17520	0.1326702	0.09446	0.07678	0.05994
170	0.23918	0.17768	0.12437	0.10030	0.07773
180	0.33217	0.24008	0.16421	0.13108	0.10062
190		0.32953	0.21823	0.17181	0.13025
200			0.29341	0.22668	0.16902
210				0.30262	0.22062
220					0.29085

T °F	15%	10%	7%	5%	3%
50	0.00154	0.00104	0.00072	0.000513	0.00031
60	0.00222	0.00148	0.00103	0.00074	0.00044
70	0.00315	0.00210	0.00147	0.00105	0.00063
80	0.00441	0.00293	0.00205	0.00146	0.00088
90	0.00609	0.00405	0.00283	0.00219	0.00121
100	0.00863	0.00548	0.00383	0.00273	0.00163
110	0.01122	0.00744	0.00519	0.00369	0.00221
120	0.01499	0.01043	0.00691	0.00492	0.00294
130	0.019837	0.01308	0.00910	0.00647	0.00387
140	0.02603	0.01711	0.01188	0.00844	0.00504
150	0.03391	0.0222	0.01538	0.01091	0.00650
160	0.04390	0.02859	0.01974	0.01397	0.00831
170	0.05653	0.03658	0.02516	0.01777	0.01054
180	0.07253	0.04654	0.03186	0.02243	0.01327
190	0.09283	0.05895	0.04012	0.02814	0.01658
200	0.11870	0.07440	0.05028	0.03510	0.02059
210	0.15198	0.09369	0.06275	0.04356	0.02542
220	0.19530	0.11786	0.07806	0.05383	0.03122
230	0.25272	0.14838	0.09693	0.06628	0.03814
240	0.33077	0.18731	0.12025	0.08139	0.04641
250		0.23767	0.14925	0.09977	0.05625

Consideremos el caso de un gas entrando en contacto con un líquido en forma homogénea por medio de un espreador. Debido a difusión y transferencia de calor con el líquido, el gas saldrá con otras condiciones de humedad y temperatura. No hay transferencia de calor con los alrededores, así que esta es una operación adiabática. Si se alcanza la saturación, la mezcla vapor-gas saldrá en equilibrio a la temperatura de saturación adiabática  $t_{sa}$  a humedad  $H_{sa}$  y entalpía de saturación adiabática  $h_{sa}$ . Mientras el gas se humedece desde  $H_1$  hasta  $H_{sa}$ , la temperatura cae desde  $t_G$  hasta  $t_{sa}$  (que también es la temperatura de entrada del líquido). Esto significa que el calor sensible cedido por el gas al enfriarse, es igual al calor latente requerido por el líquido al evaporarse. La ecuación que se aplica es:

$$C_H (t_G - t_{sa}) = (H_{sa} - H_1) \lambda_{sa} \quad (II.4)$$

$H_1$  = Humedad absoluta del gas de entrada

$\lambda_{sa}$  = Calor latente de vaporización a  $t_{sa}$

$C_H$  = Capacidad de calor húmedo de la mezcla gas-vapor

$C_H$  para aire-vapor de agua es la suma del calor específico del aire  $(0.24 \frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F})$  y del vapor de agua

$$(0.446 \frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F} )$$

Reordenando la ec. (II.4) se obtiene la relación que define las curvas de temperatura de saturación adiabática en la carta psicrométrica

$$(t_G - t_{sa}) = \frac{\lambda_{sa}}{C_H} (H_{sa} - H, ) \quad (II.5)$$

Cuando una mezcla gas-vapor tiene suficiente contacto con un líquido a  $t_{sa}$ , el gas se humedece y enfría, saturándose hasta humedad  $H_{sa}$  y temperatura  $t_{sa}$ ; si no, saldrá insaturado a otras condiciones de  $H$  y  $t_G$ .

4. Temperatura de bulbo húmedo.- Consideremos una gota de líquido en un medio donde está fluyendo una mezcla insaturada de gas-vapor del mismo líquido, cuando la gota está a la temperatura de saturación alcanzada al enfriar la mezcla gas-vapor hasta producir condensación se dice que está en su temperatura de rocío y no habrá evaporación. Si la gota se encuentra a una mayor temperatura que la de rocío del gas, entonces la presión de vapor del líquido será mayor a la presión parcial del vapor en el gas, produciéndose así su evaporación. El calor latente necesario para la evaporación se obtendrá del calor sensible del líquido, que por tanto se enfriará.

Al disminuir la temperatura del líquido abajo de la

de bulbo seco del gas (temperatura existente en el gas), comenzará a fluir calor desde el gas al líquido a una velocidad proporcional a la diferencia de temperatura entre líquido y gas cuando la velocidad de transferencia de calor desde el gas al líquido iguale la velocidad de transferencia de masa por evaporación, la temperatura del líquido permanecerá constante y ese valor alcanzado será la temperatura de bulbo húmedo  $t_{bH}$ .

Se puede definir entonces que la temperatura de bulbo húmedo es aquella temperatura de equilibrio dinámico alcanzada por una superficie de líquido cuando la velocidad de transferencia de calor por convección desde el gas hasta esta superficie es igual al calor latente requerido por la transferencia de masa desde esta superficie al gas.

La ecuación que nos define la temperatura de bulbo húmedo es:

$$t_G - t_{bH} = \frac{\lambda_{bH} (H_{bH} - H)}{hg/k_y} \quad (II.6)$$

$\lambda_{bH}$  = Calor latente de vaporización a  $t_{bH}$

$H_{bH}$  = Humedad absoluta de saturación a  $t_{bH}$

$h_G =$  Coeficiente de transferencia de calor fase gas  
(energía) / (tiempo) (area) (temperatura)

La diferencia de temperatura  $t_G - t_{bH}$  se le llama depresión de bulbo húmedo, y  $h_G/k_y$  razón psicrométrica

Se observa que ecs. (II.5) y (II.6) son similares.

Se ha demostrado experimentalmente que  $h_G/k_y$  es aproximadamente igual a la capacidad de calor  $C_H$  de la mezcla aire-vapor de agua lo que causa que la temperatura de bulbo húmedo y saturación adiabática sean casi iguales.

Al construir las curvas de  $t_{bH}$  vs  $H$  de la carta psicrométrica se considera que la pendiente de estas curvas es  $C_H/\lambda_{bH}$ , la cual tiene un punto ya fijo que está en la línea de saturación ( $t_{bH}, H_{bH}$ ). Los otros puntos se encuentran por prueba y error en los siguientes pasos:

- a) Escoger el punto fijo ( $t_{bH}, H_{bH}$ ). Obtener  $\lambda_{bH}$  a  $t_{bH}$
- b) Escoger la temperatura  $t_G$  del otro punto y suponer la humedad absoluta correspondiente ( $H$ )
- c) Calcular  $C_H$

d) Con  $H$ ,  $t_{bH}$ ,  $\lambda_{bH}$ ,  $C_H$  y  $H_{bH}$  se obtiene  $t_G$  con la ec. (II.6).

Si este valor es el escogido en inciso b, ese será otro punto ( $t_G$ ,  $H$ ) donde pasa la curva; si no fuera así se repetirá el procedimiento.

Ejemplo

a) Para el punto fijo ( $50^\circ\text{F}$ ,  $0.01043 \frac{\text{lb}_{ag}}{\text{lb}_{as}}$ )

Los subíndices  $ag$  significa agua y  $as$  aire seco  
 $\lambda$  a  $50^\circ\text{F} = 1,065.346 \text{ BTU/lb}$

b) Escogemos  $t_G = 60^\circ\text{F}$  y suponemos  $H = 0.008 \frac{\text{lb}_{ag}}{\text{lb}_{as}}$

c)  $C_H = 0.24 + 0.446 (0.008) = 0.2435 \frac{\text{BTU}}{\text{lb } ^\circ\text{F}}$

d)  $t_G = \frac{\lambda_{bH}}{C_H} (H_{bH} - H) + t_{bH}$

$t_G = 60.63^\circ\text{F}$  este valor es bastante cercano.

Suponemos ahora  $H = 0.00814$  y se obtiene  $t_G = 60.01$  el cual es un valor aceptable.

Los datos de  $t_{bH}$  contra humedad absoluta para la mezcla aire-vapor de agua obtenidos por el método descrito se presentan en la tabla II.2 y se grafican en la carta psicrométrica.

Tabla II.2 Humedades absolutas a diferentes temperaturas de bulbo húmedo ( $t_{bH}$ ) para el sistema aire-vapor de agua para una presión total de 557.8 mm Hg (Toluca, Edo. de México)

$t_{bH}$ °F	50	60	70	80	90
50	0.01043				
60	0.00814	0.01512			
70	0.00587	0.01280	0.02165		
80	0.00362	0.01050	0.01925	0.03066	
90	0.00140	0.00820	0.01695	0.02825	0.04303
100		0.00596	0.01463	0.02585	0.04055
110		0.00371	0.01230	0.02351	0.03810
120		0.00149	0.01005	0.02115	0.03566
130			0.00777	0.01881	0.03325
140			0.00555	0.01650	0.03086
150			0.00332	0.01421	0.02849
160			0.00111	0.01194	0.02613
170				0.00969	0.02380
180				0.00745	0.02148
190				0.00523	0.01920
200				0.00303	0.01691
210				0.00085	0.01466
220					0.01241
230					0.01020
240					0.00800
250					0.00580

$t_{bH}$				
$^{\circ}F$	100	105	110	115
100	0.05957			
105		0.07083		
110	0.05700		0.08336	
115				0.09812
120	0.05447	0.06692	0.08068	
130	0.05196	0.06434	0.07803	0.09401
140	0.04946	0.06178	0.07540	0.09130
150	0.04699	0.05922	0.07279	0.08861
160	0.04454	0.05666	0.07021	0.08595
170	0.04210	0.05423	0.06764	0.08330
180	0.03969	0.05175	0.06510	0.08068
190	0.03730	0.0493	0.06252	0.07808
200	0.03492	0.04686	0.06008	0.07550
210	0.03258	0.04445	0.05759	0.07295
220	0.03024	0.04206	0.05514	0.07041
230	0.02729	0.03968	0.05270	0.06790
240	0.02563	0.03733	0.05028	0.06541
250	0.02335	0.03499	0.04788	0.06294

$t_{bH}$				
$^{\circ}F$	120	125	130	135
120	0.11575			
125		0.13741		
130	0.11292		0.16143	
135				0.19233
140	0.11011	0.13302	0.15859	
150	0.10733	0.13012	0.15536	0.18755
160	0.10457	0.12725	0.15237	0.18440
170	0.10183	0.1245	0.1494	0.18129
180	0.09912	0.12159	0.14646	0.17819
190	0.09643	0.11879	0.14355	0.17513
200	0.09376	0.11601	0.14065	0.17200
210	0.09112	0.11326	0.13778	0.16905
220	0.08850	0.11053	0.13493	0.16605
230	0.08590	0.10783	0.13211	0.18311
240	0.08332	0.10515	0.12932	0.16017
250	0.08076	0.10249	0.12655	0.15724

5. Volumen húmedo.- Es el volumen que ocupa el gas junto con el vapor que contiene a las condiciones de presión y temperatura en que se encuentra.

Se define como sigue considerando gases ideales:

$$V_H = 0.73 \left( \frac{1}{M_G} + \frac{1}{M_V} \right) \frac{t_G + 460}{P} \quad (\text{II.7})$$

$V_H$  = Volumen húmedo en  $\text{ft}^3/\text{lbas}$

$P$  = Presión total del medio en atmósferas

$t_G$  = Temperatura del gas en  $^{\circ}\text{F}$

Normalmente en una carta psicrométrica se grafica el volumen húmedo de la mezcla saturada ( $V_{Hs}$ ) y del gas seco ( $V_{as}$ ) y para mezclas no saturadas se puede interpolar de acuerdo al porcentaje de humedad presente.

En la tabla II.3 se tabulan el  $V_{Hs}$  y  $V_{as}$  contra  $t_G$  para el sistema de nuestro estudio.

6. Calor húmedo.- Es la capacidad calorífica de la mezcla del gas y su vapor contenido. Se le define como el calor requerido para elevar la temperatura de una unidad de masa de gas y su vapor acompañante por un grado a presión constante. Su ecuación es:

$$C_H = C_g + H C_v$$

$C_g$  = Capacidad calorífica del gas

$C_v$  = Capacidad calorífica del vapor

7. Entalpia.- La entalpia de una mezcla gas-vapor es la suma de las entalpias del gas y del vapor.

La entalpia es una cantidad relativa, ya que no se conocen sus valores absolutos. Por tanto siempre se calculan a partir de una temperatura base  $t_0$

La siguiente ecuación nos define la entalpia de una mezcla gas-vapor:

$$h = C_g (t_G - t_0) + C_v H (t_G - t_0) + \lambda_0 H \quad (\text{II.8})$$

Normalmente se toma  $t_0$  como  $0^\circ\text{C}$  definiendo a la entalpia  $h$  como cero a esta temperatura base.

En la tabla II.3 se presentan los datos de entalpia de la mezcla gas-vapor de agua en la saturación ( $h_s$ ) y para el aire seco ( $h_{as}$ ). Estos datos se grafican en la carta psicrométrica adjunta.

Las entalpias para mezclas insaturadas, en la carta psicrométrica se pueden obtener interpolando los valores

de la entalpia en la saturación y para el aire seco a la misma temperatura de acuerdo al porcentaje de humedad.

8. Medición de la humedad.- Entre los equipos más económicos y sencillos para medir la humedad se encuentran los psicrómetros, higrómetros y medidores de bulbo húmedo.

El psicrómetro consta de 2 termómetros, uno de los cuales está directamente expuesto a la atmósfera y mide la llamada temperatura de bulbo seco; el otro está cubierto por una tela de algodón limpia e impregnada por el mismo líquido puro que humedece la atmósfera. Este mide la temperatura de bulbo húmedo.

Al psicrómetro se le hace pasar la atmósfera húmeda a medir a una velocidad de alrededor de 900 ft/min

El bulbo húmedo muestra una temperatura menor que la del seco, y la temperatura de bulbo húmedo se alcanza cuando ésta llega a un valor constante.

Con las temperaturas de bulbo seco y húmedo y utilizando la carta psicrométrica se obtiene la humedad del medio deseada.

T (°F)	V <sub>Hs</sub> (ft <sup>3</sup> /lb <sub>as</sub> )	V <sub>as</sub> (ft <sup>3</sup> /lb <sub>as</sub> )	h <sub>s</sub> (BTU/lb <sub>as</sub> )	h <sub>as</sub> (BTU/lb <sub>as</sub> )
50	17.805	17.511	15.624	4.32
60	18.288	17.854	23.175	6.72
70	18.831	18.198	32.778	9.12
80	19.455	18.541	45.160	11.52
90	20.191	18.884	61.325	13.92
100	21.069	19.228	82.212	16.32
110	22.194	19.571	111.299	18.72
120	23.621	19.914	150.187	21.12
130	25.516	20.258	204.242	23.52
140	28.138	20.601	281.634	25.92
150	31.961	20.944	397.429	28.32
160	37.985	21.288	583.309	30.72
170	48.673	21.631	917.294	33.12
180	72.370	21.974	1,663.887	35.52
190	166.464	22.318	4,641.791	37.92
200		22.661		40.32
210		23.004		42.72
220		23.348		45.12
230		23.691		47.52
240		24.034		49.92
250		24.378		52.32

Tabla II.3.- Volumen húmedo y entalpia en la saturación y de aire seco para la mezcla aire-vapor de agua para una presión atmosférica de 557.8 mm Hg. (Toluca, Edo. de México.)



## CAPITULO III

### ESTADO ACTUAL DEL SECADOR

#### III.1 Generalidades sobre un secador de aire directo.

El secador consta de un cuarto de tamaño variable en el que se introduce el sólido a secar en charolas, las cuales quedan en diferentes niveles o en carros portacharolas. En la figura III.1 se presenta un esquema de este tipo de equipo.

El secador se construye normalmente para resistir trabajo pesado con paneles y puertas de hojas metálicas gruesas.

El aire fresco primero se calienta al pasar por un intercambiador de calor y después, cuando cruza a través del producto a secar, tiene una caída de temperatura y un aumento en la humedad. Para producciones bajas el aire se calienta con calentadores eléctricos y para altas se usan radiadores con vapor.

Para productos muy resistentes al calor se pueden usar intercambiadores tubulares de gas de quemado directo, y si es posible, se usan los gases resultantes de la combustión directa de un horno.

Es conveniente que la entrada de aire fresco y los ventiladores se encuentren antes del cambiador de calor, y que la salida de aire húmedo se realice inmediatamente después de pasar por el material.

El flujo uniforme de aire que pasa por las charolas depende de la capacidad del ventilador, diseño del ducto y orientadores de flujo. Sin embargo, uno de los problemas más serios es el flujo no uniforme, que produce un secado disperejo entre el final y principio del secador.

Esto hace necesario sacar periódicamente los carros portacharolas, girarlos e introducirlos nuevamente, permitiendo que la parte más húmeda quede en contacto con el aire más caliente. Para agilizar esta maniobra los carros tienen llantas giratorias especiales para desplazarse sobre rieles. En este caso hay un aumento de trabajo y costo del producto.

Es muy importante que el material cargado en las charolas sea uniforme en profundidad y distribución para evitar el secado disperejo.

Las charolas usadas son rectangulares o cuadradas con un área hasta de  $8 \text{ ft}^2$  y de material resistente

al producto que se va a secar. Las charolas de metal son preferibles por ser mejores conductores del calor. Su altura es de 1 a 1 1/2" y la separación recomendada para obtener una baja caída de presión es de 1 a 2".

Cuando las características del material y su manejo lo permitan, se recomienda que las charolas tengan una rejilla en el fondo para mejorar el secado.

La velocidad del aire recomendada entre charolas es de 200 a 2000 ft/min. lográndose así mejores coeficientes de transferencia de calor y eliminación de estancamientos de aire.

Del total de aire en circulación dentro del secador, se recircula 90 - 95%, requiriéndose así calentar sólo la pequeña cantidad de aire que entra; de otra manera el gasto de calor sería excesivo. El porcentaje de recirculación depende de la etapa de secado.

En materiales con alto contenido de humedad o durante la primera etapa de secado, se requiere alimentar más aire fresco acelerando así la evaporación, y conservando el aire abajo del punto de rocío, evitando así la condensación. En la última etapa de secado, algunas veces

se puede recircular todo el aire, manteniendo las entradas cerradas.

Para minimizar las pérdidas de calor el equipo debe estar aislado. Las puertas, entradas y salidas deben cerrarse bien. Se recomienda en las uniones metal-metal instalar algún material aislante para evitar pérdida de energía por conducción.

La eficiencia térmica depende mucho del contenido inicial y final de humedad, diseño del secador y características del producto.

Materiales que tienen que secarse a un muy bajo contenido de humedad y donde predomina el periodo de caída de velocidad de secado tendrán altas pérdidas de calor y por esto, baja eficiencia.

Materiales con muy alto contenido de humedad y que permiten humedad final alta, tendrán buena eficiencia térmica.

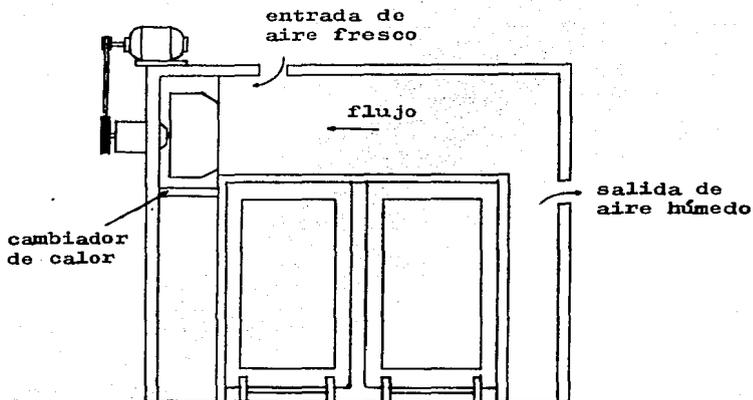


Fig. III.1 Secador de aire directo con dos carros portacharolas

### III.2 Descripción del estado del secador.

El secador que se va a optimizar se encuentra en la zona industrial de Toluca, Edo. de México, donde la presión atmosférica es de 557.8 mm Hg.

En las figuras III.2 y III.3 se presenta una vista superior y frontal de éste.

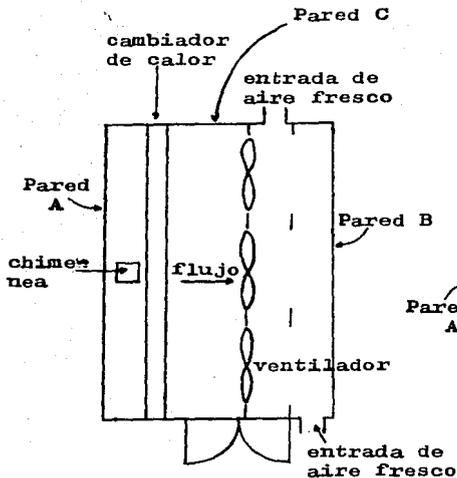


Fig. III.2 Vista superior del secador de aire directo.

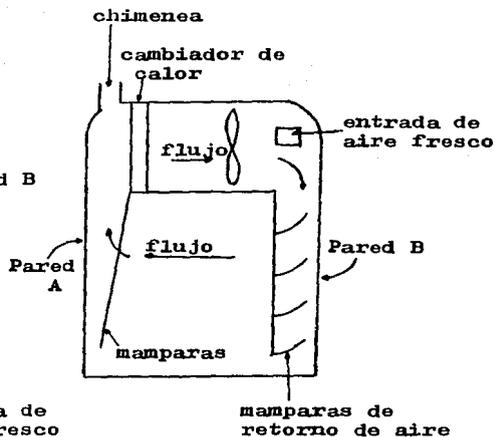


Fig. III.3 Vista frontal del secador de aire directo.

En seguida se presentan las características iniciales

Paredes.- Estas son de tabicón de construcción, huecos con las siguientes dimensiones 40 x 20 x 14.5 cm (largo, alto y ancho respectivamente).

Ventiladores.- Los 3 ventiladores que tiene giran a 2,076 R P M y son de 27"  $\phi$  y manejan 3,493.5 ft<sup>3</sup>/min. cada uno.

Cambiador de calor.- Es del tipo radiador de un paso y de un rollo de 20 tubos con diámetro exterior de 1/2" cada uno. La longitud de los tubos es de 11.5 ft y el ancho del radiador de 2.9 ft. El medio de calentamiento es vapor de agua a una presión de 43 - 57 lb/pulg<sup>2</sup>.

La medición del calor transferido por este equipo se hizo colectando el vapor condensado durante el secado de un producto. Esto se hizo dentro de un tambor perfectamente cerrado conteniendo hielo de masa conocida para bajar la temperatura del condensado inmediatamente y evitar pérdidas por evaporación.

Los datos obtenidos después de las primeras 5 hr de secado fueron:

Tiempo de recolección	60 min.
Condensado obtenido	120.5 Kg. (265.4 lb)
Presión manométrica promedio del vapor	5.1 Kg/cm <sup>2</sup>
(presión absoluta equivalente	5.83 Kg./cm <sup>2</sup> )
Calor latente de evaporación	898.6 BTU/lb

Calor transferido por el cambiador  $Q = m\lambda$

$$Q = 265.4 \times 898.6 = 238,488.4 \text{ BTU}$$

Este valor se puede redondear a  $Q = 238,500 \text{ BTU}$

Instrumentación y accesorios.- Estos se encuentran instalados en la parte trasera del secador y son los básicos para el funcionamiento del equipo. En la figura III.4 se muestran.

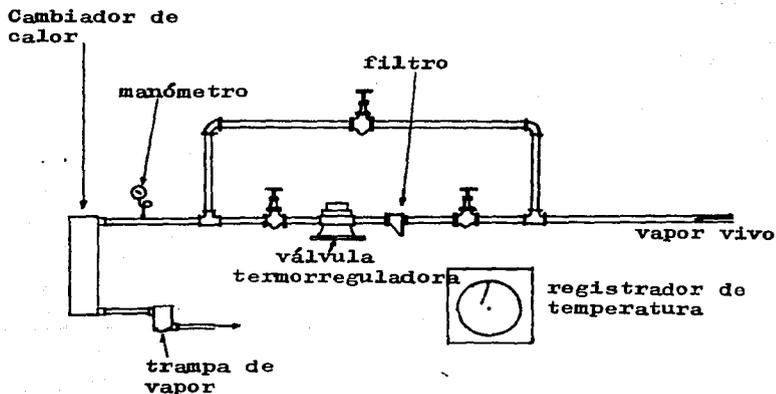


Fig. III.4 Instrumentación del secador.

Registrador de temperatura.- Tiene un rango de -20 a 150°C, es de una plumilla y usa gráficas circulares. Su forma de accionamiento es por cuerda.

Válvula termostática.- Sus conexiones son de 1" NPT con capacidad de 1815 lb/hr de vapor saturado para controlar en un rango de 70 - 105°C.

Trampa de vapor.- Tipo termostático con conexiones de 3/4" NPT con capacidad de 167.7 Kg/hr de condensado a 0.04 Kg/cm<sup>2</sup> de presión.

Carros portacharolas.- El secador tiene una capacidad de dos carros cada uno de los cuales tiene 72 charolas estando expuestas directamente al aire caliente 36 de ellas. Las ruedas delantera y trasera son del tipo giratorio para un mejor manejo.

Charolas.- Son de aluminio con dimensiones de 68 x 52 x 5 cm. El 30% están dañadas, presentando obstrucción al flujo de aire y por esto un aumento en el tiempo de secado.

Mamparas.- La mampara es una tira de metal la cual presenta una curvatura y orientación definida para

dirigir homogéneamente el aire de secado hacia las charolas con producto. El secador tiene 100 mamparas y cada una con longitud de 360 cm, ancho de 2.2 cm. y está con un dobléz de  $90^{\circ}$  a lo ancho. Todo el conjunto de ellas tiene una inclinación de  $79^{\circ}$ . La separación entre ellas es de 0.5 cm., por donde circula el aire. Se encuentran ubicadas en la pared A del secador (ver figura III.3).

En la pared B del secador se encuentran 4 mamparas adicionales de 50 cm. de ancho y 360 cm. de largo, que dirigen el aire hacia los ventiladores.

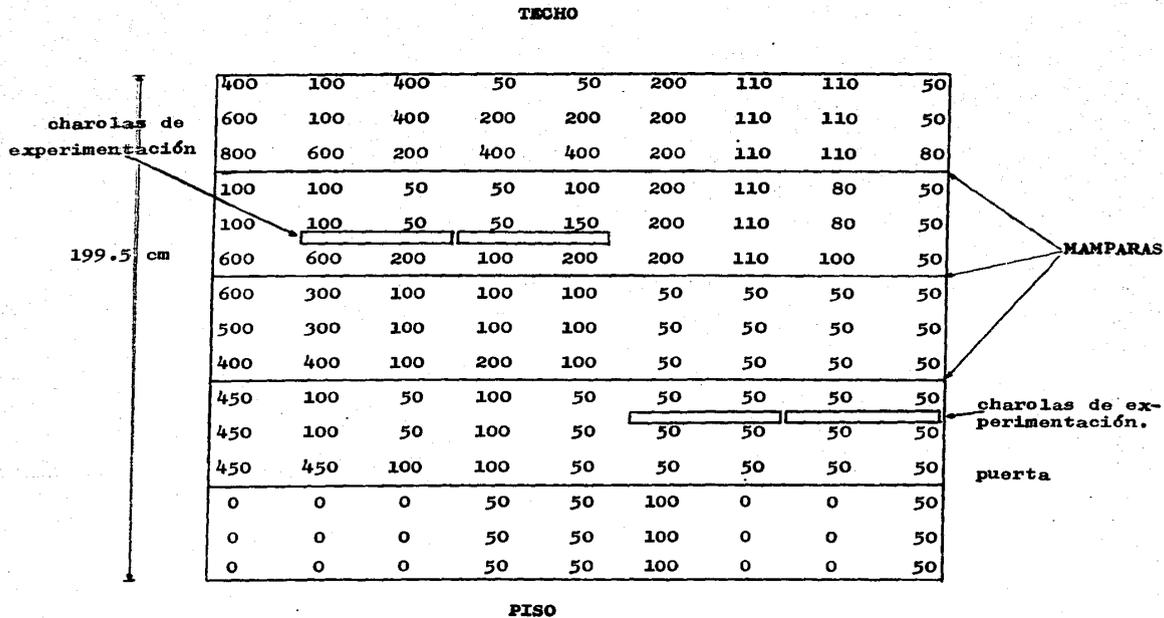
Flujo de aire de secado.- La dirección del flujo de aire dentro del secador es en dirección a las manecillas del reloj viéndolo en la fig. III.3, o sea, su orden de circulación es el siguiente: ventilador, mamparas de pared B, carros portacharolas, mamparas de pared A y serpen tín.

Esta dirección es errónea, y debido a esto las mamparas, chimenea y entrada de aire no cumplen su función.

Se midió el flujo de aire a través de toda el área transversal del secador. Las mediciones se hicieron en

las mamparas de la pared B a condiciones ambientales con dos carros con charolas llenas de producto. En la figura III.5 se presentan las velocidades encontradas en ft/min.

La velocidad promedio obtenida fué de 135.75 ft/min y el gasto volumétrico total dentro del secador es 10,480.6 ft<sup>3</sup>/min. a las condiciones existentes (557.8 mm Hg y 20°C).



**Fig. III.5** Distribución de velocidades en ft/min dentro del secador. El aire se proyecta hacia el lector.

Aire húmedo de salida y fresco de entrada.- No existe una salida de aire definida. Este sale por el ducto de la pared C, en una fuga localizada en el techo y por las guardas de los motores.

En la siguiente tabla se presentan la velocidad promedio, área y flujo volumétrico de cada parte mencionada. El gasto volumétrico total de salida es de 1,288.6 ft<sup>3</sup>/min.

Salida de aire	Velocidad promedio (ft/min)	Área de flujo (ft <sup>2</sup> )	Flujo Volumétrico (ft <sup>3</sup> /min)
Ducto	1,470	0.331	486.6
Techo	1,130	0.161	182
Guarda motor 1	1,350	0.153	207
Guarda motor 2	1,400	0.153	214
Guarda motor 3	1,300	0.153	199
			1,288.6

Considerando los promedios de tiempo de secado, temperatura y humedad del aire de salida durante las 3 etapas de secado, y usando la ecuación II.7 se calcula en la siguiente forma que la masa de aire fresco alimentado es 53.3 lb/min.

Los valores promedio se obtienen de las pruebas de secado realizadas y que más adelante se explican.

Volumen del aire húmedo de salida

$$V_H = 0.73 \left( \frac{1}{28.97} + \frac{0.0246}{18.015} \right) \left( \frac{460 + 217}{0.7339} \right) = 24.16 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Volumen de la humedad que absorbió el aire:

$$V_H = 0.73 \left( \frac{0.0246 - 0.0064}{18.015} \right) \left( \frac{460 + 217}{0.7339} \right) = 0.68 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Volumen del aire fresco a las mismas condiciones

$$V_H = 0.73 \left( \frac{1}{28.97} + \frac{0.0064}{18.015} \right) \left( \frac{460 + 217}{0.7339} \right) = 23.48 \text{ ft}^3 \text{ as}/\text{lb}$$

Aire seco alimentado

$$\frac{[1 - (0.68/24.16)] 1288.6}{23.48} = 53.3 \text{ lb as}/\text{min} = 24.2 \text{ Kg as}/\text{min}$$

Este aire fresco tiene las siguientes características:

$$P_{ab} = 557.8 \text{ mm Hg}$$

$$T_{bs} = 20^\circ\text{C} \quad (68^\circ\text{F})$$

$$T_{bh} = 10^{\circ}\text{C} (50^{\circ}\text{F})$$

$$H = 0.0064 \text{ lb ag/lb as}$$

$$V_H = 18.31 \text{ ft}^3/\text{lb as}$$

Este aire no entra por donde el diseño del equipo indica, debido a la dirección errónea del flujo del aire dentro del secador, sino que entra por la chimenea y empaques destruidos de la puerta.

### III.3 Pruebas de secado.

a) *Experimentación.*- En las condiciones descritas se procedió a secar un lote de 1,440.0 Kg con un contenido de humedad base húmeda de 86.5 % (contenido total de agua 1,245.5 Kg, peso del lote completamente seco 194.4 Kg) el cual se secó hasta un contenido de humedad de 3.6 % correspondiente a un contenido de agua de 7.3 Kg en el producto seco, resultando un total de agua evaporada de 1,238.3 Kg.

La humedad base seca ( M ) inicial fué:

$$\frac{1,245.6}{194.4} = 6.41 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$$

La experimentación se hizo de la siguiente forma:

- 1.- Las charolas se llenaron con 10.0 Kg de producto húmedo cada una y se pusieron en su respectivo carro.
- 2.- Se seleccionaron al azar dos charolas en buen estado y dos en mal estado.
- 3.- Se seleccionó la posición en la que se iban a instalar estas charolas dentro del carro y del secador, ésta debía ser una posición representativa, y el criterio usado para escogerla fué:
  - a) Que capten la influencia promedio de las diferentes condiciones existentes dentro del secador.
  - b) Se decidió instalar dos charolas, una en buenas y otra en malas condiciones, en la parte frontal e inferior del secador. Estas no debían estar hasta abajo pero tampoco arriba de la mitad de la altura del secador para que capten la influencia del aire frío que circula desde las rendijas y empaques dañados de la puerta y también del aire caliente que viene de arriba.

c) Se decidió instalar otras dos charolas, una en buenas y otra en malas condiciones en la parte superior y posterior del secador, éstas no se instalarían junto al techo ni tampoco más abajo de la mitad de la altura del secador. Esto es para que capten la influencia del aire más caliente que circula arriba y del menos caliente de la parte baja.

De acuerdo a lo expuesto se colocó una charola buena y una mala en el 4º nivel contando de abajo hacia arriba del carro que queda junto a la puerta, y en el carro posterior se colocaron en el nivel 14º (ver Fig. III.5).

Las charolas del 4º nivel se les marcó con el número 1 y las del 14º nivel con el número 2.

4.- Las charolas adjuntas a la charola buena de prueba se cambiaron por buenas para simular mejores condiciones.

Las charolas adjuntas a la charola mala de prueba se dejaron en su misma posición.

5.- Se introdujeron los carros en el secador y enseguida se puso a funcionar.

6.- Inmediatamente se inició el conteo del tiempo de secado chequeándose el peso de las charolas de prueba cada hora.

El tiempo que se usó para pesar era de menos de 5 minutos y no se consideró en la hora de secado. Los resultados se encuentran en la tabla III.1 y en las gráficas III.1, 2 y 3 se muestran las dependencias de la humedad base seca  $M$  y velocidad de secado  $dM/d\theta$  contra tiempo  $\theta$  y de  $dM/d\theta$  contra  $M$ .

Se hicieron mediciones de la humedad del aire de salida con un psicrómetro y del calor gastado, obteniéndose los siguientes resultados:

Primeras 20 horas

$$t_{bs} = 210^{\circ}F (99^{\circ}C)$$

$$t_{bH} = 104^{\circ}F (40^{\circ}C)$$

$$H = 0.0302 \text{ lb ag/lbas}$$

$$\text{Calor gastado} = 238,500.0 \text{ BTU/hr}$$

TABLA III.1 DATOS DE PRUEBAS DE SECADO  
 DE SECADOR SIN OPTIMIZAR

PRODUCTO EN CHAROLAS EN BUEN ESTADO						
1				2		
θ	W	M	$\frac{dM}{dθ}$	W	M	$\frac{dM}{dθ}$
hr	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$
0	10.0	6.41	0	10.0	6.41	0
1	9.60	6.11	0.30	9.68	6.17	0.24
2	9.30	5.89	0.22	9.38	5.95	0.22
3	8.92	5.61	0.28	9.14	5.77	0.13
4	8.52	5.31	0.30	8.94	5.62	0.15
5	8.00	4.93	0.38	8.71	5.45	0.17
6	7.38	4.47	0.46	8.14	5.03	0.42
7	6.83	4.06	0.41	7.09	4.25	0.78
8	6.57	3.87	0.19	6.08	3.50	0.75
9	6.35	3.70	0.17	5.22	2.87	0.63
10	6.10	3.52	0.18	4.68	2.47	0.40
11	5.91	3.38	0.14	4.25	2.15	0.32
12	5.70	3.22	0.16	3.88	1.88	0.27
13	5.43	3.02	0.20	3.62	1.68	0.20
14	5.10	2.78	0.24	3.40	1.52	0.16
15	4.75	2.52	0.26	3.32	1.46	0.06
16	4.30	2.18	0.34	3.24	1.40	0.06
17	3.98	1.95	0.23	3.17	1.35	0.05
18	3.65	1.70	0.25	3.10	1.30	0.05
19	3.44	1.55	0.15	3.04	1.25	0.05
20	3.30	1.44	0.11	2.97	1.20	0.05
21	3.10	1.30	0.14	2.90	1.15	0.05
22	3.00	1.22	0.08	2.82	1.09	0.06

PRODUCTO EN CHAROLAS EN BUEN ESTADO

1				2		
Ø	W	M	$\frac{dM}{dØ}$	W	M	$\frac{dM}{dØ}$
hr	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$
23	2.87	1.13	0.09	2.75	1.04	0.05
24	2.80	1.07	0.06	2.69	0.99	0.05
25	2.73	1.02	0.05	2.62	0.94	0.05
26	2.60	0.92	0.10	2.55	0.89	0.05
27	2.50	0.85	0.07	2.48	0.84	0.05
28	2.30	0.70	0.15	2.39	0.77	0.07
29	2.15	0.59	0.11	2.25	0.67	0.10
30	2.00	0.48	0.11	2.10	0.55	0.12
31	1.90	0.41	0.07	1.95	0.44	0.09
32	1.72	0.27	0.14	1.75	0.30	0.14
33	1.55	0.15	0.12	1.60	0.18	0.12
34	1.40	0.04	0.11	1.40	0.04	0.14

Nota:

W = peso de torta húmeda.

TABLA III.1 DATOS DE PRUEBAS DE SECADO  
DE SECADOR SIN OPTIMIZAR

PRODUCTO EN CHAROLAS 1				EN MAL ESTADO 2		
θ	W	M	$\frac{dM}{dθ}$	W	M	$\frac{dM}{dθ}$
hr	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$
0	10.0	6.41	0	10.0	6.41	0
1	9.68	6.17	0.24	9.87	6.31	0.10
2	9.37	5.94	0.23	9.74	6.22	0.09
3	9.07	5.72	0.22	9.61	6.12	0.10
4	8.75	5.48	0.24	9.49	6.03	0.09
5	8.45	5.25	0.23	9.35	5.93	0.10
6	8.14	5.03	0.22	9.23	5.84	0.09
7	7.91	4.86	0.17	9.05	5.70	0.14
8	7.79	4.77	0.09	8.81	5.53	0.17
9	7.68	4.69	0.08	8.52	5.31	0.22
10	7.59	4.62	0.07	8.18	5.06	0.25
11	7.49	4.55	0.07	7.80	4.78	0.28
12	7.37	4.46	0.09	7.40	4.48	0.30
13	7.13	4.28	0.18	6.88	4.10	0.38
14	6.83	4.06	0.22	6.35	3.70	0.40
15	6.49	3.81	0.25	5.80	3.30	0.40
16	6.10	3.52	0.29	5.37	2.98	0.32
17	5.74	3.25	0.27	5.00	2.70	0.28
18	5.33	2.95	0.30	4.70	2.48	0.22
19	5.18	2.84	0.11	4.43	2.28	0.20
20	5.10	2.78	0.06	4.20	2.11	0.17
21	4.98	2.69	0.09	4.02	1.98	0.13
22	4.90	2.63	0.06	3.90	1.89	0.09
23	4.82	2.57	0.06	3.85	1.85	0.04
24	4.75	2.52	0.05	3.79	1.81	0.04

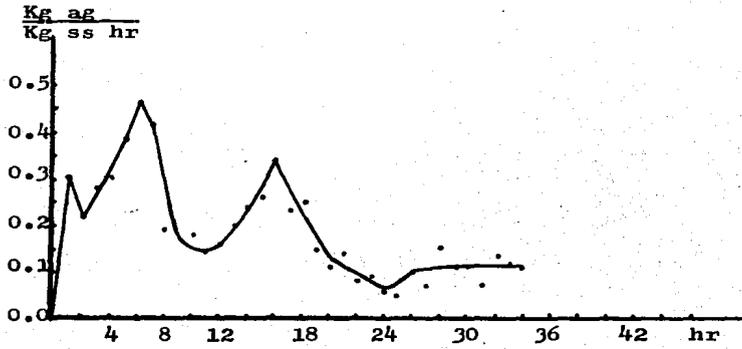
PRODUCTO EN CHAROLAS EN MAL ESTADO

1				2		
θ	W	M	$\frac{dM}{dθ}$	W	M	$\frac{dM}{dθ}$
hr	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$
25	4.67	2.46	0.06	3.74	1.77	0.04
26	4.62	2.42	0.04	3.70	1.74	0.03
27	4.55	2.37	0.05	3.64	1.70	0.04
28	4.48	2.32	0.05	3.60	1.67	0.03
29	4.44	2.29	0.03	3.52	1.61	0.06
30	4.40	2.26	0.03	3.40	1.52	0.09
31	4.25	2.15	0.09	3.17	1.35	0.17
32	3.89	1.88	0.27	2.90	1.15	0.20
33	3.50	1.59	0.29	2.74	1.03	0.12
34	3.15	1.33	0.26	2.59	0.92	0.11
35	2.85	1.11	0.22	2.44	0.81	0.11
36	2.60	0.93	0.18	2.33	0.73	0.08
37	2.40	0.78	0.15	2.24	0.66	0.07
38	2.20	0.63	0.15	2.10	0.55	0.11
39	2.05	0.52	0.11	2.00	0.48	0.07
40	1.91	0.41	0.11	1.85	0.37	0.09
41	1.80	0.33	0.08	1.75	0.30	0.07
42	1.70	0.26	0.07	1.70	0.26	0.04
43	1.60	0.18	0.08	1.60	0.18	0.08
44	1.55	0.15	0.03	1.55	0.15	0.03
45	1.45	0.07	0.08	1.45	0.07	0.08
46	1.40	0.04	0.03	1.40	0.04	0.03

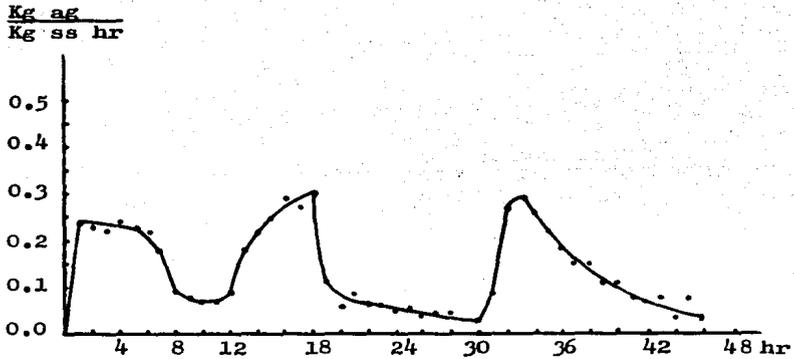
Nota:

W = peso de torta húmeda.

Gráfica III.1 Tiempo contra velocidad de secado

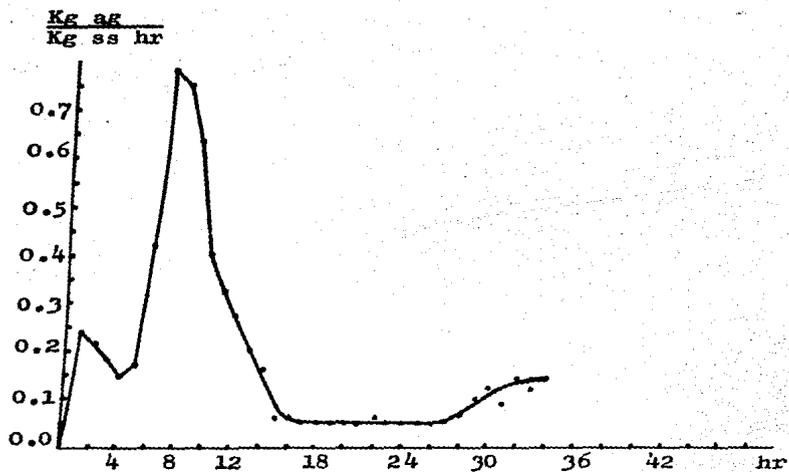
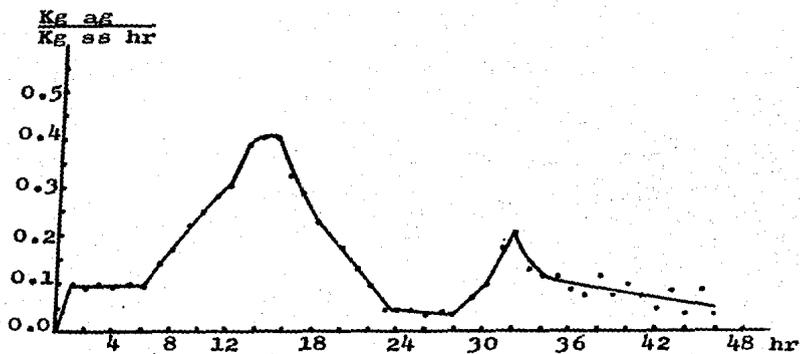


a) Charola 1 en buen estado



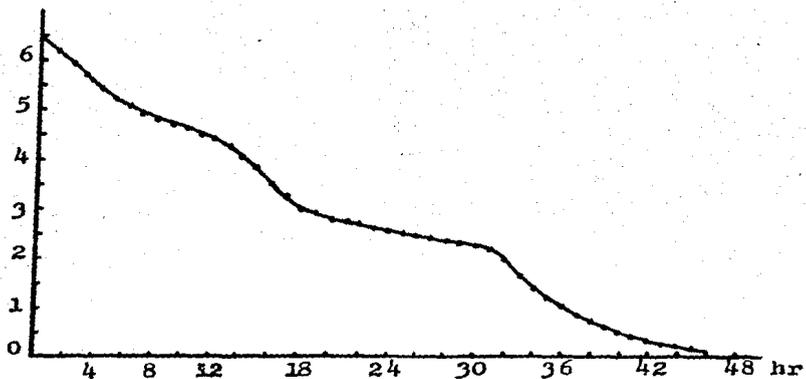
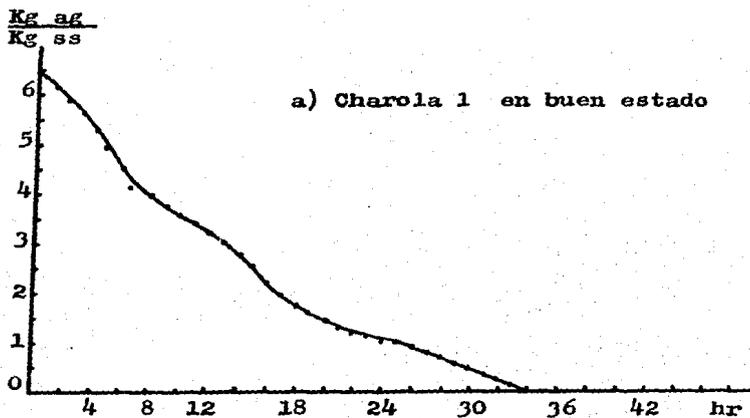
b) Charola 1 en mal estado

d) Charola 2 en mal estado



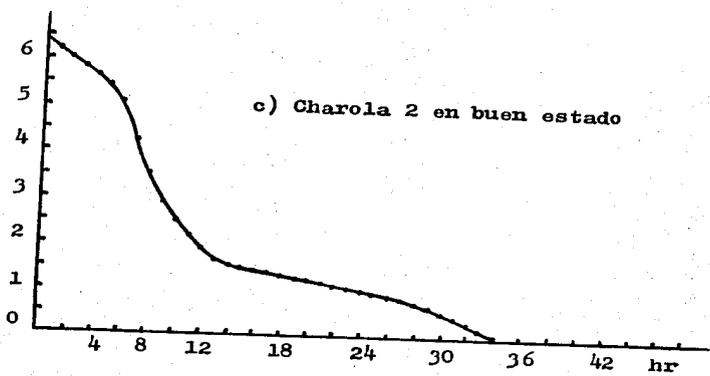
c) Charola 2 en buen estado

Gráfica III.2 Tiempo contra humedad base seca.

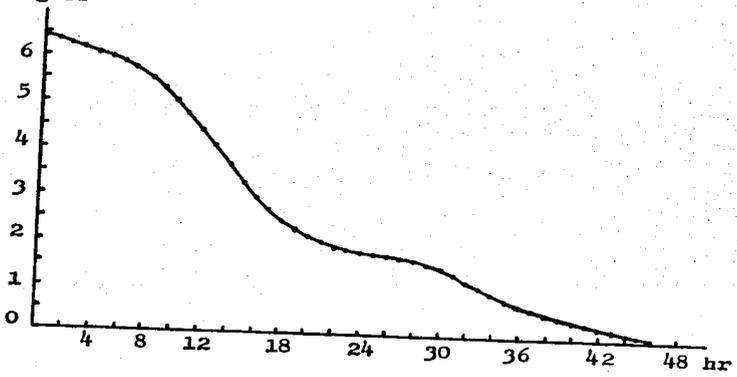


b) Charola 1 en mal estado

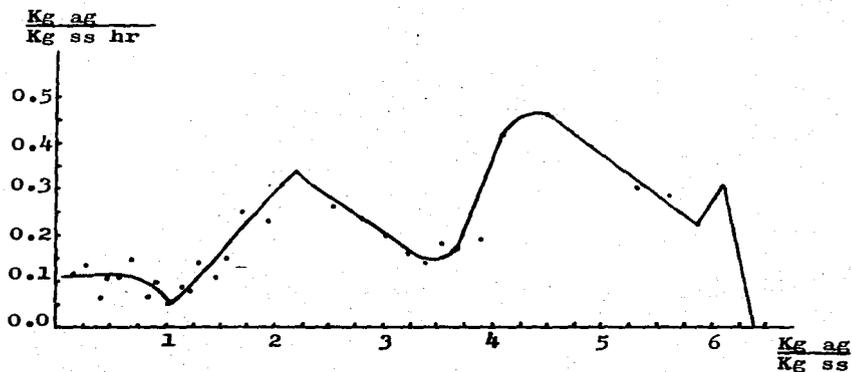
$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$



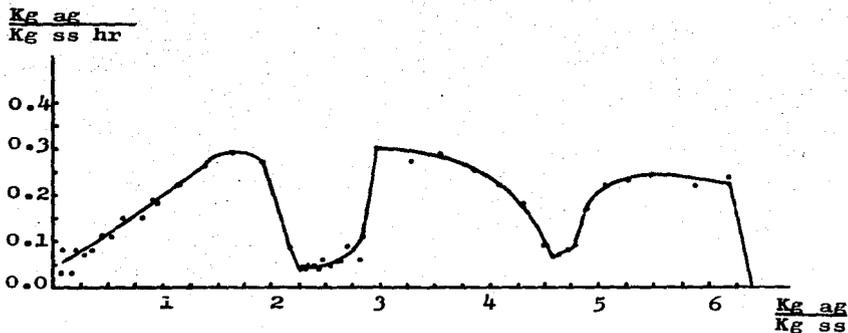
$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$



Gráfica III.3 Humedad base seca contra velocidad de secado.



a) Charola 1 en buen estado.



b) Charola 1 en mal estado.



Siguientes 12 horas

$$t_{bs} = 217^{\circ}\text{F} (103^{\circ}\text{C})$$

$$t_{bH} = 98^{\circ}\text{F} (37^{\circ}\text{C})$$

$$H = 0.0265 \text{ lb ag/lbas}$$

$$\text{Calor gastado} = 196,600.0 \text{ BTU/hr}$$

Ultimas 14 horas

$$t_{bs} = 226^{\circ}\text{F} (108^{\circ}\text{C})$$

$$t_{bH} = 92^{\circ}\text{F} (33^{\circ}\text{C})$$

$$H = 0.015 \text{ lb ag/lbas}$$

$$\text{Calor gastado} = 153,100.0 \text{ BTU/hr}$$

El tiempo de secado del producto en las charolas malas fué de 46 horas y en las charolas buenas de 34 horas.

La recolección de condensado de vapor para la medición de calor gastado se detenía cuando se paraba el secador para pesar las charolas

b) Analisis de las curvas de secado

1) Charola 1 en mal estado.

En las gráficas III.2 de tiempo contra humedad base seca se muestra que las charolas que estuvieron en la parte frontal inferior del secador presentan una caída de humedad menor con respecto al tiempo que las que están en la parte superior posterior.

La gráfica III.2b indica que la charola 1 en mal estado tiene la menor caída de humedad, o sea que el producto tiende a secarse menos cerca de la puerta debido a la entrada de aire frío por las rendijas existentes.

Esta curva tiene una caída sinuosa. Comparándola con la gráfica teórica I.1, debía ser asintótica. Las etapas de secado por esto no se pueden distinguir.

Tratando de interpretarla se podría decir que la primera etapa termina hasta las 18 horas, la segunda abarca de 18 a 32 horas y la tercera es de 32 a 46 horas. De aquí se puede ver el efecto de un equipo en mal estado, ya que hay variaciones de la velocidad de secado en forma desordenada. Estas variaciones se encuentran también en la gráfica III.1b (Vease la gráfica I.3) en la cual existen 3 puntos de velocidad alta de secado, a 1, 18 y 33 horas. En ésta tampoco se distinguen las tres

etapas ya que el intervalo de 18 a 30 horas y de 33 a 46 horas tienen comportamiento similar, sin embargo solo el segundo pertenece a la última etapa de secado.

La gráfica III.3b muestra que la velocidad de secado es independiente de la humedad base seca lo cual solo es cierto en la primera etapa. Tiene tres picos de velocidad máxima, y comparando con la gráfica I.2 la etapa de precalentamiento AB se encuentra para una M de 6.41 a 6.2 Kg ag/Kg ss, la de secado constante BC se puede decir que está entre 6.2 y 1.6 Kg ag/Kg ss y la segunda y tercera etapa CE están entre 1.6 y 0.04 Kg ag/Kg ss .

## 2) Charola 1 en buen estado

El secado del producto de la charola en buen estado ubicada en la parte frontal inferior del secador representado en la gráfica III.2a de tiempo contra humedad base seca es más parejo que el de la charola en mal estado, sin embargo la curva no es asintótica como la teórica I.1

En este caso también las etapas de secado son difi-

ciles de distinguir , pero las trataremos de diferenciar para tener una idea más del comportamiento.

La primera etapa de secado se estima que termina a las 16 horas, la segunda dura de 16 a 24 horas y la tercera es de 24 a 34 horas.

Como se puede ver, los tiempos de la segunda y tercera etapa son menores a los de la charola en mal estado.

La gráfica III.1a de tiempo contra velocidad de secado presenta dos puntos de velocidad de secado alta,  $0.46 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  a 6 hr y  $0.34 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  a 16 hr.

Estos valores son más altos que los de la charola en mal estado donde fueron menores a  $0.3 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$ .

En la gráfica III.3a las velocidades de secado mayores se presentan cuando la humedad base seca es mayor. En la charola en mal estado no se observó esta tendencia sino que pareciera que la velocidad de secado es independiente de la humedad base seca.

Las curvas de secado para esta charola en buen estado son muy diferentes a las teóricas I.1 ; esto se debe al comportamiento heterogéneo del secador en mal estado.

3) Charola 2 en mal estado.

En la gráfica III.2d la curva de secado de M vs  $\theta$  tiene menos inflexiones que la de charola 1 en mal estado, además se observa mejor la tendencia asintótica. Las etapas de secado se pueden diferenciar mejor.

Aparece un secado de baja velocidad durante las primeras 8 horas el cual equivale a el tiempo de precalentamiento.

Este es muy largo y se debe a los bloqueos que presenta la charola al aire por su mal estado. La primera etapa de secado sucede de 8 a 18 horas, la segunda de 18 a 30 horas y la tercera de 30 a 46 horas.

En la gráfica III.3d se ve que la velocidad máxima de secado,  $0.4 \text{ Kg ag/Kg ss hr}$ , es mayor que la de la charola 1 en mal estado  $0.3 \text{ Kg ag/Kg ss hr}$ . Esto hace notar que en la parte superior posterior del secador hay mejores condiciones para el secado como son mayor velocidad del aire y mayor temperatura, ya que no hay ninguna entrada de aire frío en esa parte.

En la gráfica III.1d la curva presenta dos puntos de velocidad máxima, uno de  $0.4 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  a 15 ho-

ras y otro de  $0.2 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  a 32 horas.

El secado en este caso se realiza tambien en 46 horas.

#### 4) Charola 2 en buen estado

La gráfica III.2 c presenta una caída de la humedad con respecto al tiempo muy alta. Esta curva tiene un parecido mayor que todas las demás a la teórica I.1. Las etapas de secado tampoco se distinguen bien, pero tentativamente las dividiremos.

La etapa de precalentamiento dura una hora, la primera etapa de 1 a 17 horas, la segunda de 17 a 27 horas y la tercera de 27 a 34 horas. El tiempo de secado es de 34 horas.

En esta charola es donde se alcanza la máxima velocidad de secado,  $0.78 \text{ Kg ag/Kg ss hr}$ . En la charola 1 en buen estado el máximo alcanzado fué de  $0.46 \text{ Kg ag/Kg ss hr}$ .

De lo anterior se deduce que la charola 2 en buen estado ubicada en la parte posterior superior del secador es la que presenta las mejores condiciones de secado.

De acuerdo al análisis presentado, el secado en los 4 casos es muy disparejo y es difícil definir las etapas de secado. Esto es por las condiciones tan variadas que existen dentro del equipo por su mal estado. En el frente el aire es más frío por las entradas que permite la puerta por mal sellado en empaques dañados y también por la baja velocidad de su circulación; en la parte trasera por una mayor temperatura y mayor velocidad del aire.

Dentro del secador las condiciones debían ser las mismas para que el secado fuera parejo y eficiente, sin embargo esto no sucede.

c) Eficiencia

El lote se requiere secar a  $82^{\circ}\text{C}$ , y de hecho es la temperatura que existe dentro del secador y a la cual como máximo debía salir el aire, sin embargo debido a las fallas del equipo, éste sale a  $99 - 103^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, el tiempo de secado que por experiencia se tiene es de 30 - 35 horas.

El calor total gastado para el secado fué:

$$\begin{array}{r} 20 \times 238,500 = 4,770,000 \\ 12 \times 196,600 = 2,359,200 \\ 14 \times 153,100 = \underline{2,143,400} \\ 9,272,600 \text{ BTU} \end{array}$$

El calor teórico  $Q_t$  que debía gastarse considerando 35 horas de secado es:

Por el aire alimentado

$$Q_a = (C_G + C_v H) (t_G - t_o) \quad \dot{Q}_s \times 60 \text{ min/hr} \times \text{mas}$$

$$\dot{Q}_s = 35 \text{ hr}$$

$$\text{mas} = 53.3 \text{ lbas/min (aire fresco alimentado)}$$

$$t_G = 82^\circ\text{C} \quad (180^\circ\text{F})$$

$$t_o = 20^\circ\text{C} \quad (68^\circ\text{F})$$

$$H = 0.0064 \text{ lbag/lbas}$$

$$Q_a = (0.24 + 0.446 \times 0.0064) (180 - 68) \quad 35 \times 60 \times 53.3$$

$$Q_a = 3,044,462.0 \text{ BTU}$$

Por el agua evaporada

$$Q_v = m_{ag} [C_v (t_G - t_o) + \lambda_o]$$

$$m_{ag} = 1238.3 \text{ Kg} \quad (2,727.5 \text{ lb})$$

$$\lambda_o = 1055.0 \text{ BTU/lb (calor latente de vaporización a } 68^\circ\text{F)}$$

$$Q_v = 2727.5 [0.446 (180 - 68) + 1055.0]$$

$$Q_v = 3,013,757.0 \text{ BTU}$$

Por el producto

$$Q_p = m_p C_p (t_G - t_o) + m C_{ag} (t_G - t_o)$$

El primer término se refiere al producto seco  $m_p$  y el segundo a su agua contenida  $m$

$$m_p = 194.4 \text{ Kg}$$

$$C_p = 0.165 \frac{\text{cal}}{\text{gr}^\circ\text{K}}$$

$$m = 7.3 \text{ Kg}$$

$$C_{ag} = 1. \frac{\text{cal}}{\text{gr}^\circ\text{K}}$$

$$\begin{aligned} Q_p &= (194,400 \times 0.165 + 7,300 \times 1) (355 - 293) \\ &= 2,441,312.0 \text{ cal} \\ &= 9,688.0 \text{ BTU} \end{aligned}$$

El calor teórico resultante es

$$Q_t = Q_a + Q_v + Q_p$$

$$Q_t = 6,067,907.0 \text{ BTU}$$

Considerando pérdidas del 10 % de calor por calentamiento del equipo y accesorios, la eficiencia térmica es:

$$n_t = \left( \frac{6,067,907.0}{9,272,600.0} (1.1) \right) \times 100 = 72.0 \%$$

El aprovechamiento del equipo por tiempo es:

$$n_o = \left[ 1 - \frac{46 - 35}{35} \right] \times 100 = 68.6 \%$$

Estos valores de eficiencia ( $\eta$ ) son bajos, por lo que es muy necesaria la optimización del secador.

d) Análisis económico del Secado

El costo del Kg de vapor a una presión manométrica de 5.1 Kg/cm<sup>2</sup> es de \$ 3.00 y éste tiene un calor latente de condensación de 898.6 BTU/lb.

Vapor requerido:

$$\frac{9,272,600.0 \text{ BTU}}{898.6 \text{ BTU/lb}} = 10,319.00 \text{ lb}$$

Costo del vapor:

$$10,319.00 \times \$3.00 = \$ 30,957.00$$

Costo de la corriente eléctrica para los motores

El equipo tiene 3 motores trifásicos de 2 HP de potencia.

Costo de la potencia

$$P = 0.00173 \text{ VIy}$$

$$P = \text{potencia (Kw)}$$

$$V = \text{voltaje (220 volts)}$$

$$I = \text{corriente (3.6 amperes)}$$

$$y = \text{factor de potencia (0.95)}$$

Costo del Kw-hr = \$ 16.00

$P = 0.00173 \times 220 \times 3.6 \times 0.95 =$

$P = 1.30 \text{ Kw}$

ya que son tres motores y el secado se realiza en 46 horas.

Costo de la potencia =  $3 \times 1.30 \times 46.0 \times \$ 16.00 = \$2,870.00$

En este costeo no se incluye la depreciación del equipo por ser ya muy viejo ( 20 años de vida) y haberse depreciado totalmente. En su lugar se incluye un costo de 5 % del total para mantenimiento.

Costo del vapor	\$ 30,957.00
Costo de la potencia	\$ 2,870.00
5 % mantenimiento	\$ 1,691.00

---

Costo del secado con el equipo sin optimizar.	\$ 35,518.00
---	--------------

## CAPITULO IV

### OPTIMIZACION DEL SECADOR

#### IV.1 Rediseño del secador

Se analizó las partes que no requerían modificación que fueron: cambiador de calor, instrumentación carros portacharolas, charolas y ventiladores.

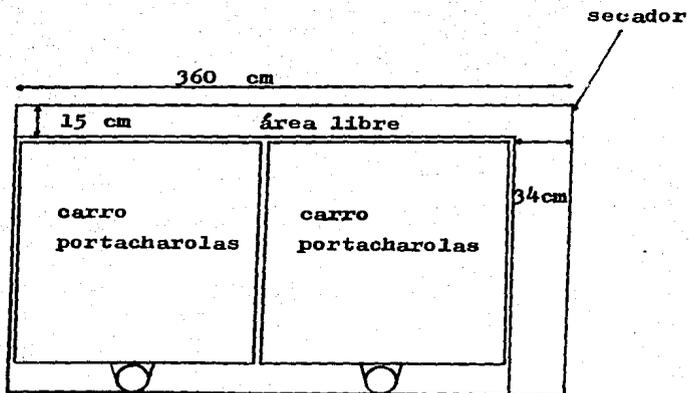
Las charolas en mal estado se repararon, y las inservibles se desecharon. Esto mejoró el paso del aire entre ellas.

Modificaciones efectuadas dentro del secador

##### a) Area libre de circulación de aire

En el secador existe área transversal libre que permite que circule el aire sin restricción, lo cual provoca que aproximadamente el 60 % del gasto volumétrico total se desplace por esta área y no se aproveche para el secado. En la figura IV.1 se presenta esta área.

El área en la parte superior de los carros es de 19.5 x 360 cm y en la pared trasera de 180 x 38 cm. Estas se cubrieron instalando una caja adicional al techo con dimensiones de 15 x 160 x 360 cm y en la pared trasera un muro de tabicón a lo largo de ésta que bloqueó un área de 34 x 180 cm.



**Fig. IV.1** Área de circulación libre de aire dentro del secador.

b) Ductos de entrada a los ventiladores.

Los ventiladores no tenían estos ductos y se les instaló, éstos fueron de 61 cm de largo y 70 cm de diámetro (ver figura IV.2).

La falta de los ductos crea caída de presión en el aire provocando una caída en el volumen manejado y aumento de los bHP requeridos.

c) Mamparas de las esquinas superiores.

Ayudan a distribuir homogéneamente el aire, evitan una caída alta de presión en el aire y mejoran el secado; las cuales se calcularon de acuerdo a la referencia ( 8 ) donde el número de mamparas recomendado para bajas velocidades de flujo es 7, con radio de curvatura de  $d/5$  y longitud de segmento de  $d/3$ , donde  $d$  es el ancho del lado del ducto de salida.

1. Mamparas de la esquina superior de la pared A.

Separación entre mamparas:

$$\sqrt{\frac{56^2 + 100^2}{8}} = 14.3 \text{ cm}$$

$$\text{radio de curvatura } \frac{56}{5} = 11.2 \text{ cm}$$

$$\text{longitud de segmento } \frac{56}{3} = 18.6 \text{ cm}$$

2. Mamparas de la esquina superior de la pared B.

En este lado existe una placa que presenta 3 entradas circulares de 70 cm de diámetro c/u correspondientes una a cada ventilador. En este caso  $d = 70$  cm.

$$\text{Separación entre mamparas } \frac{\sqrt{70^2 + 56^2}}{8} = 11.2 \text{ cm}$$

$$\text{Radio de curvatura } \frac{70}{5} = 14 \text{ cm}$$

$$\text{Longitud de segmento } \frac{70}{3} = 23.3 \text{ cm}$$

Existe una ceja de 15 cm en la parte superior de la entrada circular que provocaba que el aire chocara generando turbulencia y caída de presión. Se instaló un semicírculo de lámina con radio de curvatura de 56 cm y longitud de segmento tal que cubre desde la pared B hasta la placa.

Las mamparas se describen en la figura IV.2

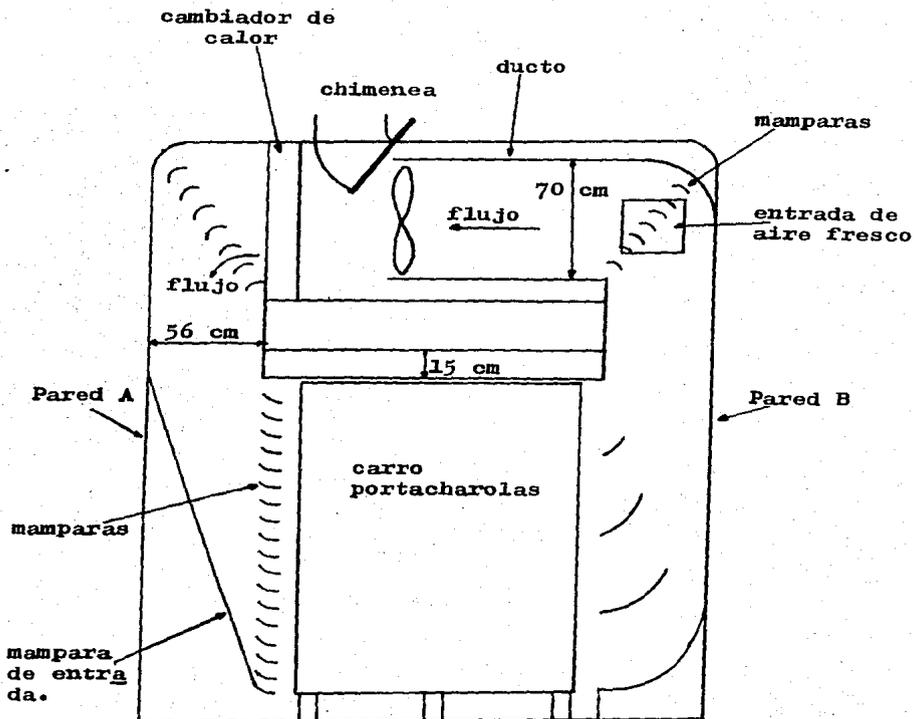


Fig. IV.2 Secador con sus partes rediseñadas.

d) Mamparas que dirigen el aire hacia charolas.

Las mamparas que existían no son las adecuadas, pues debido al ángulo que presentaban no dirigían el aire hacia las charolas. Se diseñaron otras con el método de referencia ( 5 )

La ecuación de diseño de estas mamparas es:

$$\text{Cot } \theta = \frac{CAf}{A_e}$$

C = Coeficiente de descarga, 0.9

$\theta$  = Angulo de curvatura en la entrada

Af = Área del flujo de descarga

$$Af = 326 \text{ cm} \times 159.5 \text{ cm} = 51,997.0 \text{ cm}^2$$

Ae = Área del ducto de entrada

$$Ae = 326 \text{ cm} \times 56 \text{ cm} = 18,256.0 \text{ cm}^2$$

La longitud de segmento L de cada mampara es dos veces la distancia de separación entre ellas.

$$\text{Cot } \theta = \frac{0.9 \times 51,997 \text{ cm}^2}{18,256 \text{ cm}^2} = 2.56$$

$$\theta = 21.3^\circ$$

En la figura IV.3 se describen estas mamparas

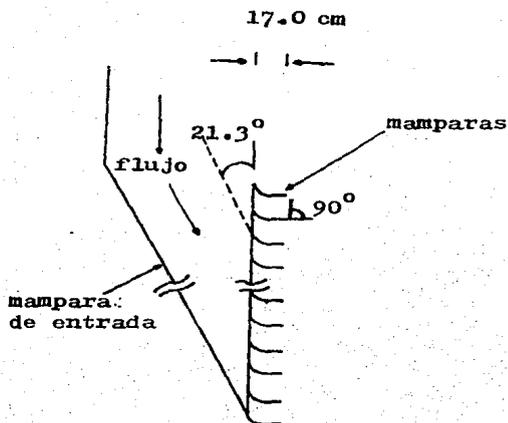


Fig. IV.3 Mamparas que dirigen el flujo hacia los carros portacharolas.

La orientación de las mamparas en la descarga es paralela a las charolas.

La mampara de entrada es una placa plana la cual se inicia donde termina el ducto de entrega de aire y termina en la última mampara inferior.

Se instalaron 18 mamparas con las siguientes características:

Longitud de segmento      17.0 cm

Angulo de entrada          21.3°

Separación entre ellas      8.5 cm

También se instaló una mampara de entrada.

e) Inversión de la dirección del flujo de aire.

Se cambió la dirección del aire a contramanecillas de reloj desplazándose ahora en el siguiente orden: mamparas de pared A, carros portacharolas, mamparas de pared B, ventiladores y cambiador de calor.

Esto se hizo para evitar que el aire recién calentado por el cambiador pase primero por los ventiladores dándole menor vida a los rodamientos y bandas.

f) Flujo volumétrico del aire.

Después de hacer las modificaciones mencionadas se hicieron mediciones de velocidad de aire en la descarga de las mamparas de la pared A a la altura de cada charola y a las siguientes condiciones:

- 1.- Con dos carros con charolas dentro
- 2.- A condiciones ambientales

3.- Con chimenea y entradas de aire cerradas.

Los resultados se presentan en la figura IV.4

La velocidad promedio fué  $341.3 \text{ ft}/\text{min}$ , hubo un aumento de  $151.4 \%$  y el flujo volumétrico fué  $19,077 \text{ ft}^3/\text{min}$  aumentando  $82.0 \%$ .

g) Entradas de aire fresco.

Se diseñaron usando el método de referencia ( 6 )

Se instalaron entradas de aire fresco en la esquina superior de la pared B, antes de los ventiladores, una enfrente y otra atrás del secador, y para evitar una caída de presión alta tienen una orientación de  $45^\circ$ . Son de forma cuadrada.

Ya que a estos secadores es conveniente alimentar como máximo de  $5$  a  $10 \%$  del gasto volumétrico interno de aire fresco, se tomó la mitad de  $1,908 \text{ ft}^3/\text{min}$  para cada entrada de aire fresco (ver inciso f)

Cálculos:

Se requiere la velocidad en la esquina superior de pared B

charola					
18	320	280	320	400	420
17	460	280	320	400	410
16	440	300	350	400	400
15	340	300	300	430	430
14	330	320	320	310	350
13	400	300	350	330	360
12	380	350	400	410	400
11	350	460	390	370	400
10	350	410	390	410	450
9	350	400	350	280	400
8	330	400	350	280	360
7	280	320	320	320	400
6	290	280	280	310	350
5	250	240	300	290	350
4	300	330	300	290	330
3	300	270	280	300	380
2	270	330	300	280	300
1	300	300	300	290	300

Fig. IV.4 Velocidades de aire frente a cada charola en la sección transversal del secador. (  $\frac{ft}{min}$  )

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

$$v_1 = 341.3 \text{ ft/min} \quad (\text{velocidad promedio del aire dentro del secador})$$

$A_1$  = Area de circulación del aire en sección transversal

$$A_1 = 326 \text{ cm} \times 159.5 \text{ cm} = 51,997 \text{ cm}^2$$

$A_2$  = Area de circulación en la esquina superior de pared B.

$$A_2 = 360 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} = 25,200 \text{ cm}^2$$

$v_2$  = Velocidad del aire en la esquina superior de pared B.

$$v_2 = \frac{341.3 \times 51997}{25,200} = 704.23 \text{ ft/min}$$

La presión de velocidad  $V_p$  del aire en  $A_2$  es

$$v_p = \left( \frac{v_2}{4005} \right)^2$$

$$v_p = \left( \frac{704.23}{4005} \right)^2 = 0.03092 \text{ pulg de agua.}$$

Presión de velocidad es la presión que ejerce el aire debido a la velocidad que lleva y se obtiene en pulgadas de agua cuando la velocidad está en ft/min en la ecuación anterior.

La caída de presión he por entrada es

$$h_e = F \times v_p$$

F = Factor de pérdida por la entrada

Para una orientación de  $45^\circ$ ,  $F = 0.28$  (de fig

6-13 del libro mencionado en este inciso)

Para las dos entradas

$$h_e = 2 (0.28 \times 0.03092)$$

$$h_e = 0.017316 \text{ pulg de agua}$$

La  $v_p$  nueva se obtiene con la fórmula

$$v_p = s_p - h_e$$

$s_p$  = Presión estática del aire en pulgadas de agua.

$$s_p = \left( \frac{v}{4005 C_e} \right)^2$$

$C_e$  = Coeficiente de entrada

$$C_e = 0.9$$

Para las dos entradas  $C_e = 0.9 \times 0.9 = 0.81$

$$s_p = \left( \frac{704.23}{4005 \times 0.81} \right)^2 = 0.04713$$

$$v_p = s_p - h_e = 0.047125 - 0.01736 = 0.02977$$

Velocidad del aire en la entrada de aire

$$v = 4005 \sqrt{vp}$$

$$v = 4005 \sqrt{0.02977} = 691.0 \text{ ft/min}$$

Area requerida por cada entrada:

$$A = \frac{1908}{2 \times 691.0} = 1.38 \text{ ft}^2$$

El método usado es para ductos circulares y el diámetro del ducto es

$$dc = \sqrt{\frac{A}{0.785}}$$

$$dc = \sqrt{\frac{1.38}{0.785}} = 1.326 \text{ ft}$$

La entrada se hizo de ducto cuadrado, por lo que el tamaño equivalente al diámetro dc del ducto circular calculado se obtiene de la fórmula de referencia ( 4 ).

$$dc = 1.3 \sqrt[8]{\frac{(ab)^5}{(a+b)^2}}$$

a y b = lados del rectángulo en pulgadas

dc = diámetro del ducto circular en pulgadas

Despejando para un ducto cuadrado:

$$a = 0.915 \times dc$$

$$a = 0.915 \times 15.96 = 14.6 \text{ pulg}$$

$$a = 37 \text{ cm/lado}$$

y la entrada de aire fresco será un ducto cuadrado de 37 cm de lado orientado  $45^{\circ}$  en dirección al flujo.

#### h) Chimenea.

La chimenea se instaló en el techo, antes del cambiador de calor y después del ventilador del centro. Se fabricó de tipo rectangular y con un segmento movable que sirve como compuerta para controlar el flujo como se describe en la figura IV.5

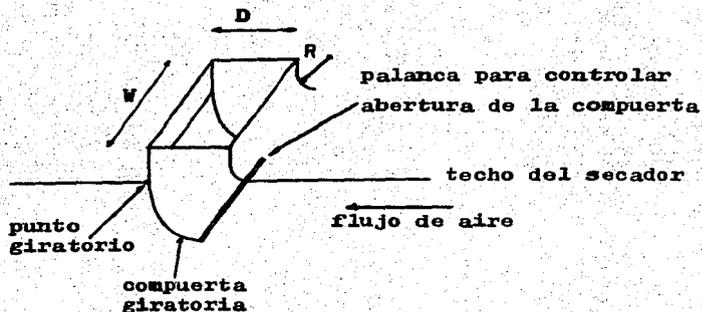


Fig. IV.5 Chimenea

Se midió la velocidad después del ventilador y ésta fué de 1150 ft/min.

Presión de velocidad:

$$v_p = \left( \frac{1150}{4005} \right)^2 = 0.08245 \text{ pulg de agua}$$

La caída de presión para el codo rectangular de la chimenea es 0.13  $v_p$  ( de fig. 6-12 del libro mencionado en inciso g) cuando  $\frac{R}{D}$  y  $\frac{W}{D}$  son 1.5

$$v_p = 0.08245 (1 - 0.13) = 0.071732 \text{ pulg de agua}$$

$$v = 4005 \sqrt{v_p} = 4005 \sqrt{0.071732}$$

$$v = 1073 \text{ ft/min}$$

$$A = \frac{1908 \text{ ft}^3/\text{min}}{1073 \text{ ft/min}} = 1.78 \text{ ft}^2$$

$$\text{Si } D = 34 \text{ cm} = 1.1 \text{ ft}$$

$$W = \frac{1.78}{1.1} = 1.62 \text{ ft} = 50 \text{ cm}$$

Las dimensiones del ducto de la chimenea son:

$$D = 34 \text{ cm}$$

$$W = 50 \text{ cm}$$

#### IV.2 Pruebas de secado.

##### a) Experimentación.

Una vez rediseñado y modificado el secador, se realizaron pruebas de secado en forma similar a como se hicieron

ron con el equipo sin optimizar, con lotes con las mismas características y cantidad.

Las pruebas se hicieron alimentando diferentes cantidades de aire fresco las cuales fueron: 390 ft<sup>3</sup>/min (9.7 Kg as/min), 700 ft<sup>3</sup>/min (17.3 Kg as/min), 1000 ft<sup>3</sup>/min ( 24.8 Kg as/min) y 1500 ft<sup>3</sup>/min (37.2 Kg as/min). Las condiciones del aire fueron: presión atmosférica 557.8 mmHg y temperatura de 20°C.

El secado se siguió en dos charolas con producto que fueron colocadas en la misma posición que las charolas buenas en las pruebas del equipo sin optimizar, una en el 4º nivel en el frente y otra en el 14º nivel en la parte superior posterior del secador. La caída del peso del producto de las dos charolas fué similar en las pruebas.

En la tabla IV.1 se encuentran el tiempo contra caída de peso, humedad base seca y velocidad de secado para las diferentes cantidades de aire fresco de cada prueba.

Los valores de la tabla IV.1 se grafican para humedad base seca y tiempo contra velocidad de secado, y tiempo contra humedad base seca en gráficas IV.1, IV.2 y IV.3 .

Tabla IV.1.- Resultados obtenidos al secar con diferentes cantidades de aire fresco (as) en el secador rediseñado.

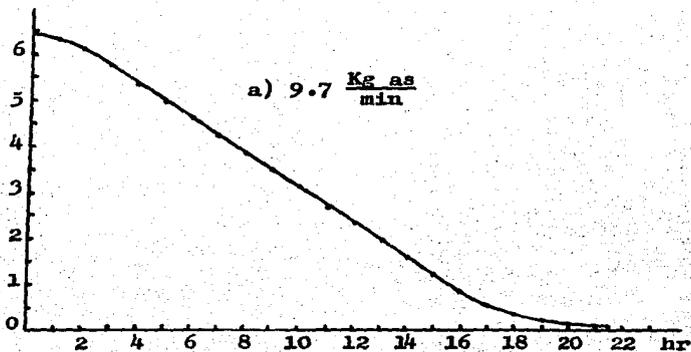
as Kg/min		9.7			17.3		
e	W	M	$\frac{dM}{d\theta}$	W	M	$\frac{dM}{d\theta}$	
hr	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$	Kg	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss\ hr}$	
0	10	6.41	0	10	6.41	0	
1	9.90	6.33	0.08	9.72	6.2	0.21	
2	9.60	6.11	0.22	9.00	5.66	0.54	
3	9.05	5.70	0.41	8.20	5.07	0.59	
4	8.50	5.30	0.40	7.40	4.48	0.59	
5	8.00	4.93	0.37	6.60	3.89	0.59	
6	7.55	4.59	0.34	5.80	3.30	0.59	
7	7.00	4.18	0.41	5.10	2.78	0.52	
8	6.50	3.81	0.37	4.40	2.26	0.52	
9	6.00	3.44	0.37	3.75	1.78	0.48	
10	5.60	3.15	0.29	3.15	1.33	0.45	
11	4.95	2.67	0.48	2.65	0.96	0.37	
12	4.50	2.32	0.34	2.30	0.70	0.26	
13	4.00	1.96	0.37	2.00	0.48	0.22	
14	3.45	1.55	0.41	1.75	0.30	0.18	
15	2.95	1.18	0.37	1.60	0.19	0.11	
16	2.40	0.78	0.40	1.50	0.11	0.08	
17	2.05	0.52	0.26	1.46	0.08	0.03	
18	1.70	0.26	0.26	1.42	0.05	0.03	
18.5				1.40	0.04	0.02	
19	1.60	0.18	0.08				
20	1.50	0.11	0.07				
20.9							
21	1.42	0.05	0.06				
21.5	1.40	0.04	0.02				

Tabla IV.1.- Resultados obtenidos al secar con diferentes cantidades de aire fresco (as) en el secador rediseñado.

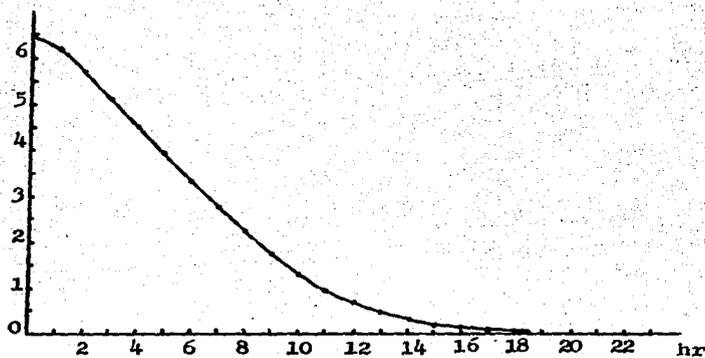
as		24.8			37.2		
Kg/min		W	M	$\frac{dM}{d\theta}$	W	M	$\frac{dM}{d\theta}$
hr	Kg	$\frac{Kg\ as}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ as}{Kg\ ss\ hr}$		Kg	$\frac{Kg\ as}{Kg\ ss}$	$\frac{Kg\ as}{Kg\ ss\ hr}$
0	10.0	6.41	0		10	6.41	0
1	9.30	5.89	0.52		9.55	6.07	0.34
2	8.40	5.22	0.67		8.83	5.54	0.53
3	7.70	4.70	0.52		8.15	5.04	0.50
4	6.90	4.11	0.59		7.50	4.56	0.48
5	6.15	3.55	0.56		6.80	4.04	0.52
6	5.40	3.00	0.55		6.20	3.59	0.45
7	4.70	2.48	0.52		5.50	3.07	0.52
8	4.00	1.96	0.52		4.90	2.63	0.44
9	3.36	1.49	0.47		4.30	2.19	0.44
10	2.85	1.11	0.38		3.75	1.78	0.41
11	2.40	0.78	0.33		3.25	1.41	0.37
12	2.16	0.60	0.18		2.85	1.11	0.30
13	1.95	0.44	0.16		2.50	0.85	0.26
14	1.78	0.32	0.12		2.20	0.63	0.22
15	1.60	0.19	0.13		2.00	0.48	0.15
16	1.50	0.11	0.08		1.80	0.33	0.15
17	1.45	0.07	0.04		1.65	0.22	0.11
18	1.42	0.05	0.03		1.55	0.15	0.07
18.5	1.40	0.04	0.02				
19					1.46	0.08	0.07
20					1.42	0.05	0.03
20.9					1.40	0.04	0.01

Gráfica IV.1 Tiempo contra humedad base seca para el secado con diferentes cantidades de aire fresco alimentado.

$\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$

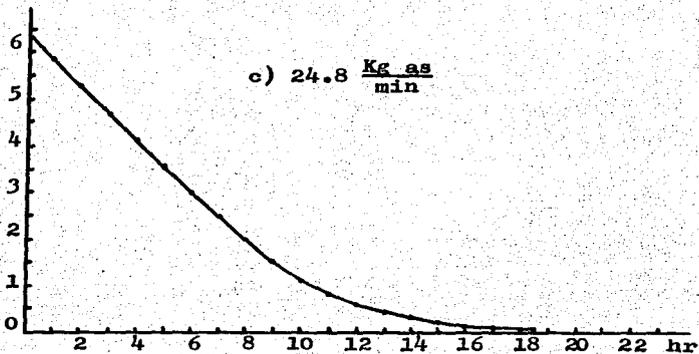


$\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$

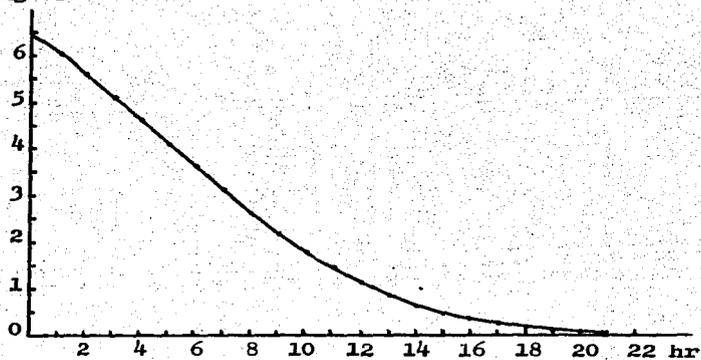


b)  $17.3 \frac{\text{Kg as}}{\text{min}}$

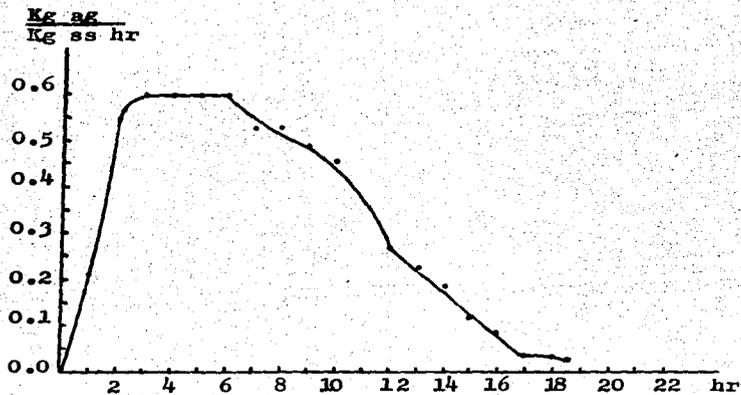
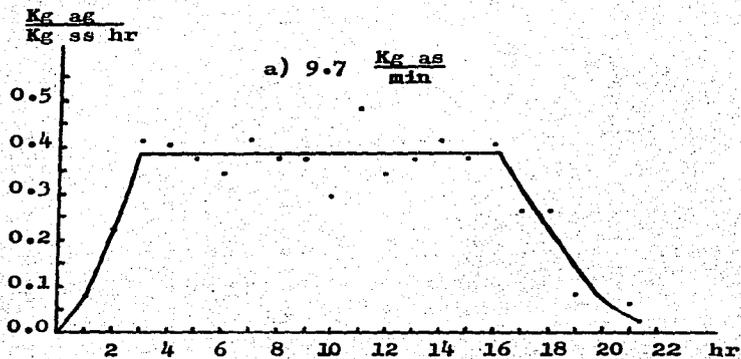
$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$

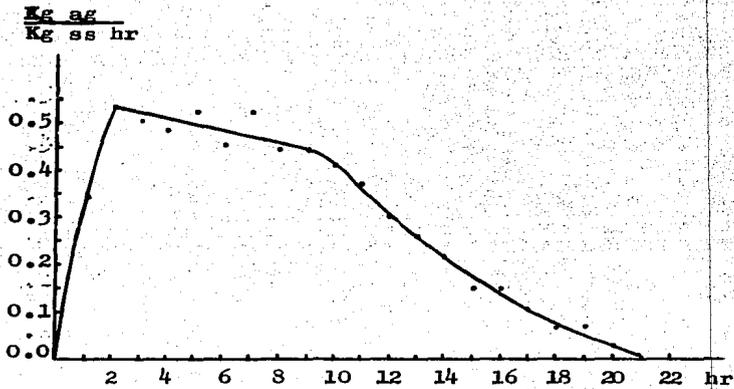
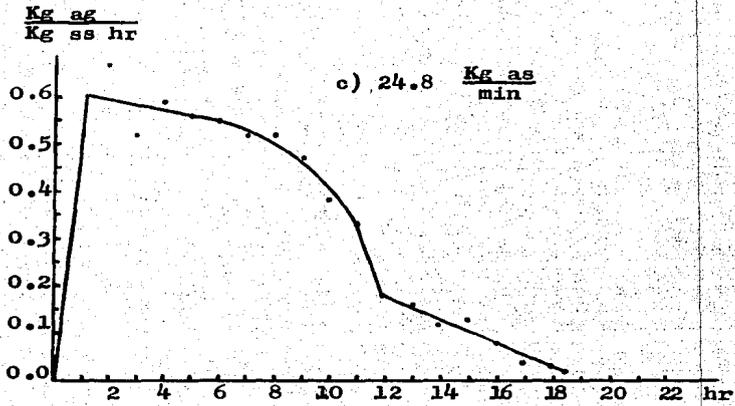


$\frac{Kg\ ag}{Kg\ ss}$

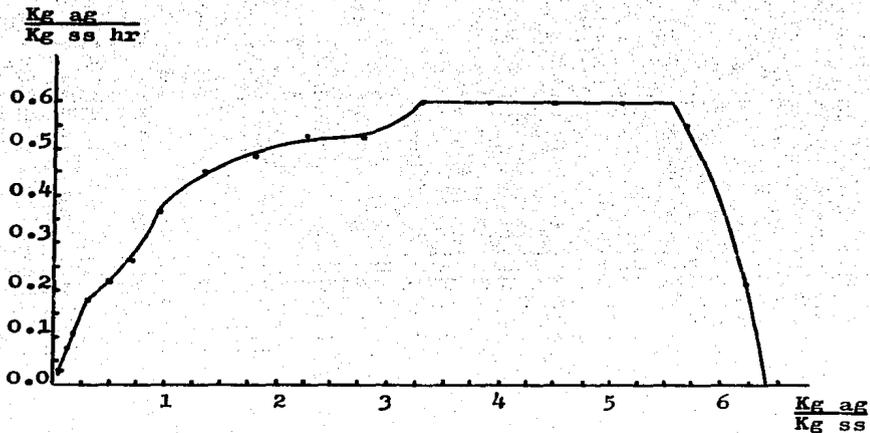
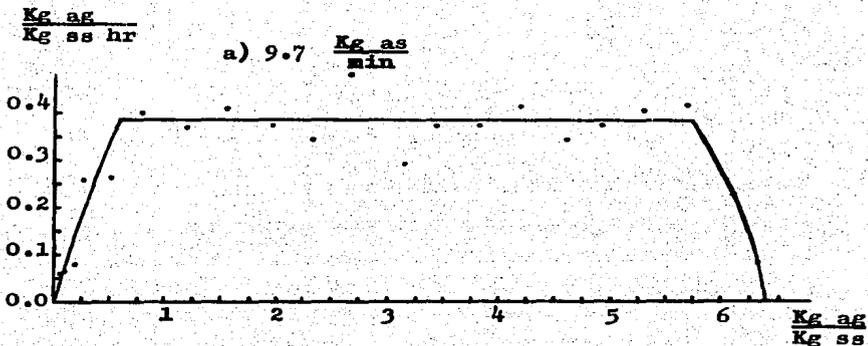


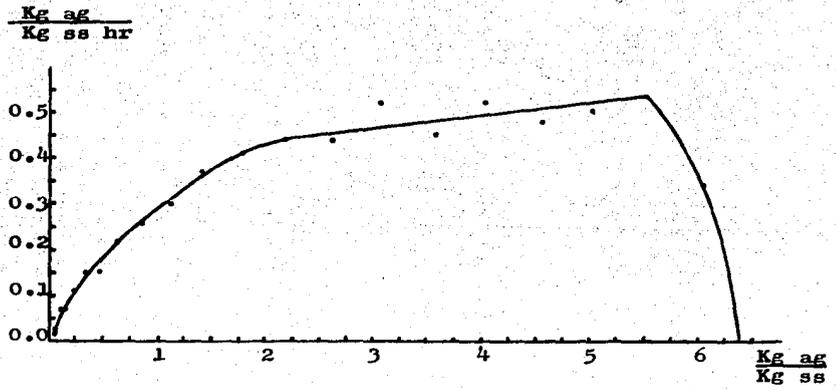
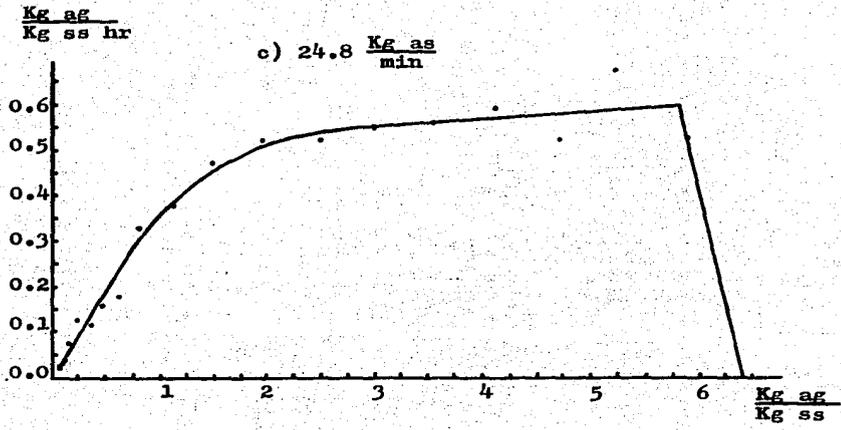
Gráfica IV.2 Tiempo contra velocidad de secado para diferentes cantidades de aire fresco alimentado.





Gráfica IV.3 Humedad base seca contra velocidad de secado para diferentes cantidades de aire fresco alimentado.





d)  $37.2 \frac{\text{Kg as}}{\text{min}}$

b) Análisis de las curvas de secado.

1. Comparación del secado con el del equipo sin optimizar.

En la tabla IV.2 se comparan los datos del secado del equipo sin / y optimizado.

Las curvas de secado con 24.8 Kg as/min del equipo optimizado son las únicas comparables con las de las charolas buenas del equipo sin optimizar en el que se alimentó 24.2 Kg as/min . Las curvas de tiempo contra humedad base seca M de charolas del equipo sin optimizar (gráfica III.2 a y c ) presentan varias inflexiones y tienen una caída de M irregular, lo que impide diferenciar las etapas de secado. La humedad M de 1.0  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$  se alcanza hasta las 25.5 y 24 hr para charolas 1 y 2 en buen estado respectivamente. El tiempo de secado fué de 34 horas.

Para el caso del equipo optimizado, la curva (gráf. IV.1c) es parecida a la teórica de gráfica I.1 aunque más horizontal, su caída es pareja. Las etapas de secado se diferencian correctamente, la primera dura hasta las 6 horas, la segunda de 6 a 12 horas y la tercera de 12 a 18.5 horas. La humedad base seca de 1.0  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$

se alcanza a 10.5 horas, que es menos de la mitad del tiempo que usó el equipo sin optimizar. El tiempo de secado total fué de 18.5 horas que también es un valor muy bajo, 15.5 horas menos que el equipo sin optimizar.

Las curvas de tiempo contra velocidad de secado ( $\frac{dM}{d\theta}$ ) del equipo sin optimizar (graf III.1 a y c), para la charola 1 tiene 3 puntos máximos de  $dM/d\theta$ , a la primera hora de  $0.3 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$  a una M de 6.11  $\frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss}}$  (ver graf. III.3a), a las 6 horas de  $0.46 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$  a una M de 4.47  $\frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss}}$  y a las 16 horas de  $0.34 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$  a una M de 2.18  $\frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss}}$ .

Tambien presenta tres puntos de mínima velocidad de secado que conforme va avanzando el secado son más bajos, uno a 2 horas de  $0.22 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$ , otro a las 11 horas de  $0.14 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$  y el último a las 25 horas de  $0.05 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$ . Se observa que de 26 a 34 horas la velocidad de secado sube ligeramente a  $0.11 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$ .

Para la charola 2 presenta dos puntos de velocidad de secado máxima, uno en la primera hora de  $0.24 \frac{Kg \text{ ag}}{Kg \text{ ss hr}}$

a una M de 6.17 Kg ag/Kg ss (ver graf. III.1c y 3c) y a las 7 horas de 0.78 Kg ag/Kg ss hr a una M de 4.25  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$ . A las 4 horas  $\frac{dM}{d\theta}$  empieza a subir desde 0.15  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  hasta alcanzar 0.78 Kg ag/Kg ss hr a las 7 horas, pero ésta inicia su caída inmediatamente hasta llegar nuevamente a 0.15 Kg ag/Kg ss hr a las 14 horas. Esta subida y caída dura 10 horas, sin embargo una  $\frac{dM}{d\theta}$  mayor a 0.55  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  no duró más de 3 horas lo cual indica un secado instantáneo rápido pero pobre por su corta duración.

Posteriormente la velocidad cae hasta 0.05  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  manteniéndose así de 17 a 27 horas y termina finalmente el secado a 0.14  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$ .

Este comportamiento de velocidad es muy desordenado.

Comparando el secado en el equipo optimizado, (graf IV.2c), éste se realiza más cercano al teórico de graf I.3. La  $\frac{dM}{d\theta}$  sube inmediatamente en poco más de 1 hora a un máximo de 0.58  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  cuando M es 5.83  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$ , después baja lentamente a una velocidad de seca

do cuya caída es directamente proporcional al tiempo que termina a las 6 horas a  $0.55 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  y M de  $3.0 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$  momento en que se inicia la segunda etapa que finaliza a las 12 horas a  $0.18 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  y M de  $0.45 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$ . El secado terminó con la tercera etapa a  $0.02 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  y M de  $0.04 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$ .

Como se puede observar, el secado en el equipo optimizado es homogéneo y sin desviaciones fuertes de la teoría, lo cual como se verá en el análisis de las demás pruebas es más eficiente.

El secado en el equipo sin optimizar es muy heterogéneo y con demasiadas desviaciones en forma desordenada e impredecible, además el tiempo de secado es muy alto, 15.5 horas más, lo cual denota la ineficiencia que tiene el equipo.

## 2. Comparación del secado en el equipo optimizado.

En la tabla IV.2 se presenta el comportamiento del secado para las diferentes cantidades de aire fresco alimentado. En ésta se aprecia directamente las variaciones existentes en el secado.

Tabla IV.2 Comparación de las características de las etapas de secado para varias cantidades de aire fresco alimentado (as) en el equipo sin/y rediseñado.

Charola en buen estado	Equipo sin rediseñar		Equipo rediseñado			
	1	2				
as	24.2	24.2	9.7	17.3	24.8	37.2
<b>Etapas de Secado</b>						
<b>Pre calentamiento</b>						
Duración	0.0 a 1.0	0.0 a 1.0	0.0 a 3.0	0.0 a 3.0	0.0 a 1.2	0.0 a 2.0
Velocidad de secado	0.0 a 0.30	0.0 a 0.25	0.0 a 0.38	0.0 a 0.59	0.0 a 0.6	0.0 a 0.53
Caída de humedad base seca	6.41 a 6.11	6.41 a 6.17	6.41 a 5.73	6.41 a 5.55	6.41 a 5.83	6.41 a 5.55
<b>Primera etapa</b>						
Duración	1.0 a 16.0	1.0 a 17.0	3.0 a 16.2	3.0 a 6.0	1.2 a 6.0	2.0 a 9.0
Velocidad de secado	variable; ptos. max. 0.46 y 0.34	variable; ptos. max. 0.24 y 0.78	0.38	0.59	cae directamente proporcional al tiempo 0.60 a 0.55 0.53 a 0.44	
Caída de humedad base seca	6.11 a 2.15	6.17 a 1.45	5.73 a 0.60	5.55 a 3.3	5.83 a 3.0	5.55 a 2.20

Charola en buen estado	Equipo sin rediseñar		Equipo rediseñado			
	1	2				
as	24.2	24.2	9.7	17.3	24.8	37.2
<b>Etapa de Secado</b>						
<b>Segunda etapa</b>						
Duración	16.0 a 24.0	17.0 a 27.0	16.2 a 20.0	6.0 a 12.0	6.0 a 12.0	9.0 a 18.0
Velocidad de secado	0.34 a 0.06	0.05	0.38 a 0.07	0.59 a 0.26	0.55 a 0.18	0.44 a 0.08
Caída de humedad base seca	2.15 a 1.07	1.45 a 0.85	0.6 a 0.11	3.3 a 0.95	3.0 a 0.45	2.20 a 0.15
<b>Tercera etapa</b>						
Duración	24.0 a 34.0	27.0 a 34.0	20.0 a 21.5	12.0 a 18.5	12.0 a 18.5	18.0 a 20.9
Velocidad de secado	0.06 a 0.11	0.05 a 0.13	0.07 a 0.02	0.26 a 0.02	0.18 a 0.02	0.08 a 0.01
Caída de humedad base seca	1.07 a 0.04	0.85 a 0.04	0.11 a 0.04	0.95 a 0.04	0.45 a 0.04	0.15 a 0.04

Nota: Las unidades de las expresiones usadas son: duración, hr; velocidad de secado,  $\frac{Kg}{Kg\ ss\ hr}$ ; caída de humedad base seca  $\frac{Kg}{Kg\ ss}$ ; y

aire fresco alimentado,  $\frac{Kg}{min}$ .

Basándonos en la tabla mencionada y las gráficas IV.1, 2 y 3 enseguida se analizan las pruebas.

La etapa de precalentamiento varía para las cuatro diferentes cantidades de aire fresco usado. La prueba con 17.3 Kg as/min es la que alcanza la mayor  $\frac{dM}{d\theta}$ , 0.59  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  con una caída de M a 5.55  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$ . La que obtiene el menor valor, 0.38  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$ , es la de 9.7 Kg as/min donde M baja hasta 5.73  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$ .

En la primera etapa el secado con 9.7 y 17.3 Kg as/min permanecen con la velocidad constante y la caída de M es hasta 0.6  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$  a las 16 horas 12 min y 3.3  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$  a las 6 horas respectivamente.

El tiempo de esta etapa es muy largo para el caso de 9.7 Kg as/min, pero la caída de M es la mayor, lo que es excelente ya que los otros no bajan de este valor sino hasta la segunda etapa.

Para 24.8 y 37.2 Kg as/min,  $\frac{dM}{d\theta}$  no permanece constante sino que cae a 0.55  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  con M de 3.0 y a 0.44  $\frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  con M de 2.2 respectivamente. La caída de  $\frac{dM}{d\theta}$  es directamente proporcional al tiempo y a M

hasta bajar a los valores mencionados.

En la segunda etapa la velocidad de secado con 9.7 Kg as/min es la que cae más bajo,  $0.07 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$ , sin embargo es la que llega a la menor M,  $0.11 \text{ Kg ag/Kg ss}$ , le sigue el de 37.2 Kg as/min con  $0.08 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss hr}}$  con M de  $0.15 \frac{\text{Kg ag}}{\text{Kg ss}}$ .

Los que tienen los menores tiempos de duración de la tercera etapa son las pruebas con 9.7 y 37.2  $\frac{\text{Kg as}}{\text{min}}$  que son 1.5 y 2.9 horas respectivamente.

Como se puede notar, el comportamiento del secado para cada cantidad de aire fresco alimentado es variable aunque las curvas se acercan bastante a la teoría, por lo que no se puede ver desde aquí una tendencia hacia el valor adecuado.

En el siguiente inciso se hace el análisis económico, llegándose al volumen de aire requerido para el secado más económico.

c) Análisis económico del secado.

Secado con 9.7 Kg as/min (21.3 lb as/min)

Calor gastado.

El gasto de calor dependió de la cantidad de aire fresco alimentado siendo éste caso el más bajo.

En seguida se presenta el cálculo para el gasto de calor teórico y posteriormente lo compararemos con el real no tándose de esta forma la eficiencia obtenida.

Calor gastado por el aire alimentado.

$$Q_a = \text{mas} (C_G + C_v H) (t_G - t_o) \theta_s$$

$$C_G = \text{capacidad calorífica del aire} \left(0.24 \frac{\text{BTU}}{\text{lb } ^\circ\text{F}}\right)$$

$$C_v = \text{capacidad calorífica del vapor de agua} \left(0.446 \text{ BTU}/\text{lb } ^\circ\text{F}\right)$$

$$H = \text{humedad absoluta del aire fresco} \left(0.0064 \text{ lb ag}/\text{lb as}\right)$$

$$t_G = \text{temperatura de salida de aire} \left(180^\circ\text{F}\right)$$

$$t_o = \text{temperatura de entrada del aire} \left(68^\circ\text{F}\right)$$

$$\theta_s = \text{tiempo de secado} \left(21.5 \text{ hr}\right)$$

$$\text{mas} = \text{masa de aire fresco alimentado} \left(21.3 \text{ lb as}/\text{min} = 9.7 \text{ Kg as}/\text{min}\right)$$

$$Q_a = 21.3 \text{ lb as/min} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \left( 0.24 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} + 0.446 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times 0.0064 \frac{\text{lb ag}}{\text{lb as}} \right) (180^\circ\text{F} - 68^\circ\text{F}) \times 21.5 \text{ hr}$$

$$Q = 747,366.00 \text{ BTU}$$

Calor gastado por el agua evaporada.

$$Q_v = 3,013,757.0 \text{ BTU}$$

Calor gastado por el producto

$$Q_p = 9,688.0 \text{ BTU}$$

Calor total teórico

$$Q_{ta} = Q_a + Q_v + Q_p$$

$$Q_{ta} = 3,770,811.0 \text{ BTU}$$

Este es el calor teórico, pero el real fué mayor, 4,213,000.0 BTU lo cual se debe a calentamiento del equipo (secador, carros y charolas) y pérdidas diversas por paredes, piso y por abrir el secador para checar la humedad del producto.

Costo del secado.

El costo del Kg de vapor a una presión manométrica de  $5.1 \text{ Kg/cm}^2$  es de \$3.00 y éste tiene un calor latente de condensación de  $898.6 \text{ BTU/lb}$ .

Vapor requerido:

$$\frac{4,213,000.0 \text{ BTU}}{898.6 \text{ BTU/lb}} = 4,688.0 \text{ lb}$$

Costo del vapor

$$4,688.0 \text{ lb} \times \$3.00 = \$14,064.0$$

Costo de la corriente eléctrica para los motores.

El equipo tiene 3 motores trifásicos de 2 HP de potencia.

La potencia se calcula de la misma forma que para el equipo sin optimizar.

$$P = 1.30 \text{ Kw}$$

Ya que son 3 motores y el secado se realiza en 21.5 hrs:

$$\begin{aligned} \text{Costo de la potencia} &= 3 \times 1.30 \times 21.5 \times \$16.00 \\ &= \$1,342.00 \end{aligned}$$

En este costo no se incluye la depreciación del equipo por ser ya muy viejo (20 años de vida) y haberse depreciado totalmente. En su lugar se está incluyendo un costo del 5 % del total para mantenimiento.

Pesos del vapor	§ 14,064.00
Pesos de potencia	1,342.00
5 % de mantenimiento	<u>770.00</u>
Costo de cada lote	§ 16,176.00

Secado con 9.7 Kg as/min

En la misma forma se calcula el calor gastado, potencia y costo del secado para las diferentes cantidades de aire fresco alimentado.

Estos datos se presentan en la tabla IV.3 y en la gráfica IV.4

Se observa que el secado de menor costo es aquel efectuado con 9.7 Kg as/min dando como resultado un tiempo de secado de 21.5 hr, calores teórico y real gastado de 3,770,811.0 y 4,213,000.0 BTU respectivamente y un costo de § 16,176.00.

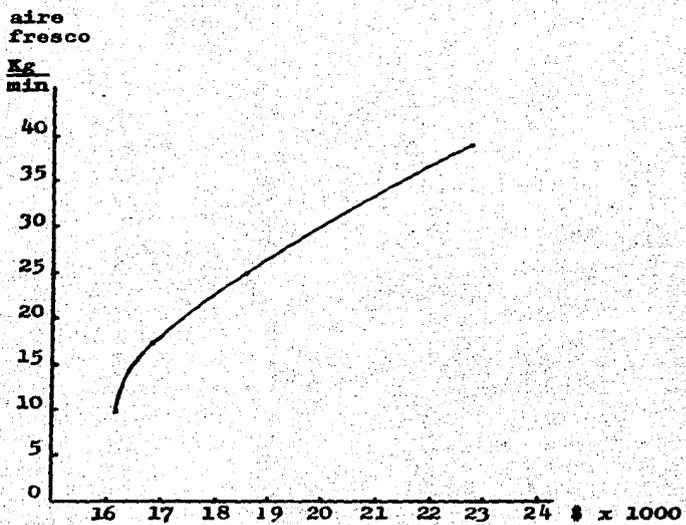
Comparando los valores de tiempo de secado, calor gastado y costo obtenidos para el caso 9.7 Kg as/min con los valores originales del equipo sin optimizar, se obtienen los datos de la tabla IV.4 donde se encuentra que el mejoramiento de la eficiencia es mayor al 100 % y el ahorro por lote es de § 19,342.00

**TABLA IV.3 COSTO DEL SECADO PARA DIFERENTES CANTIDADES DE AIRE FRESCO.**

Aire fresco alimentado (Kg as/min)	9.7	17.3	24.8	37.2
Tiempo de secado (hr)	21.5	18.5	18.5	20.9
Calor teórico gastado (BTU)	3,770,811.00	4,176,766.0	4,671,910.0	5,768,240.0
Calor real gastado (BTU)	4,213,000.00	4,460,000.0	4,942,500.0	6,084,000.0
Costo del secado (pesos)	16,176.00	16,845.00	18,537.00	22,695.00

**TABLA IV.4 AUMENTOS DE EFICIENCIA Y AHORROS OBTENIDOS  
CON EL SECADOR OPTIMIZADO**

			Ahorro	Aumento de la eficiencia (%)
Aire fresco alimentado (Kg as/min)	9.7	24.2		
Tiempo de secado (hr)	21.5	46.0	24.5	113.9
Calor real gastado (BTU)	4,213,000.0	9,272,600.0	5,059,600.0	120.1
Costo del secado (pesos)	16,176.00	35,518.00	19,342.00	119.6



Graf. IV.4 Pesos contra aire fresco alimentado.

## C O N C L U S I O N

Se realizó en el secador lo siguiente:

Se diseñaron las mamparas de las esquinas superiores, y las que dirigen el aire hacia charolas; la chimenea y las entradas de aire fresco, además también se reubicaron; se instalaron ductos en la succión de los ventiladores; se bloquearon las áreas libres al paso del aire; se estableció la dirección del flujo de aire contra manecillas del reloj y se corrigieron las charolas en mal estado.

Posteriormente se hicieron pruebas de secado con diferentes cantidades de aire fresco obteniéndose un ahorro excelente en calor y tiempo en todas éstas.

La prueba realizada con 9.7 Kg as/min fué la que dió el secado óptimo. Comparándola con la hecha con el equipo en su estado original se logró un ahorro de 5,059,600.0 BTU, 24.5 hr y \$19,342.0 por lote con los siguientes aumentos de eficiencia respectivamente: 120.1%, 113.9% y 119.6%.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- Douglas M. C.  
Process Instruments and Controls Handbook,  
Mc. Graw Hill Inc.,  
New York, 1974  
Pág. 103 - 104
  
- 2.- Ernst R. C. and Tiller M.,  
Industrial and Engineering Chemistry, 30,  
1938, Pág. 1119 - 1121.
  
- 3.- Gardner W.,  
Industrial Drying,  
Leonard Hill, London, 1971,  
Pág. 67 - 89.
  
- 4.- "Heating, Refrigerating, Ventilating and Air  
Conditioning, Guide and Data Book Equipment",  
American Society of Heating, Refrigerating and  
Air Conditioning Engineers,  
New York, 1969  
Pág. 29
  
- 5.- "Heating, Ventilating, Air Conditioning Guide",  
American Society of Heating, Refrigerating  
and Air Conditioning Engineers, 38, 1960  
Pág. 282 - 283
  
- 6.- "Industrial Ventilation a Manual of Recommended  
Practice",  
Committee on Industrial Ventilation,  
Lansing, Michigan, 1976  
Pág. 26 y 33

- 7.- Lapple C. and Clarck E.,  
Chemical Engineering, 62 (11), 1955  
Pág. 177 - 182
- 8.- Over E. and Pankhurst R.,  
The Measurement of Air Flow,  
Pergamon, New York, 1966,  
Pág. 107
- 9.- Perry R. H. and Chilton C. H.,  
Chemical Engineers' Handbook,  
Mc Graw Hill Inc. New York 1963,  
Pág. 12 - 2 y 12 - 12
- 10.- Shepherd C. and Hadlock C.,  
Industrial and Engineering Chemistry, 30, 1938  
Pág. 388 - 393
- 11.- Sherwood T.,  
Industrial and Engineering Chemistry, 21, 1929  
Pág. 12 - 13
- 12.- Sloan C. and Wheelock,  
Chemical Engineering, 74 (13), 1967  
Pág. 170 - 193 y 201 - 204
- 13.- Treybal R. E.,  
Mass Transfer Operations,  
Mc Graw Hill Inc.,  
New York, 1980,  
Pág. 224 - 240 y 660 - 682

TESIS CON FALLA DE ORIGEN