

F 463
C-2



**Escuela Superior Politécnica
del Litoral.**

**FACULTAD DE INGENIERIA
MECANICA**

**“Diseño Térmico de un Secador de
Cacao del Tipo Plataforma.”**

PROYECTO IDE GRADO

**Previo a la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO**

Presentado por:

Manuel Kennedy Fierro Salazar

Guayaquil

-

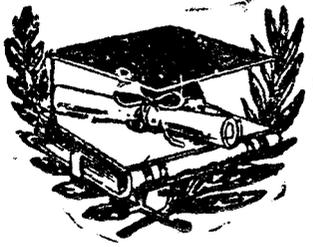
Ecuador

1990



D-10246

CIB



**El Jurado Calificador otorga a este
Trabajo la**

Calificación de _____

Equivalente a: - - - _____

A G R A D E C I M I E N T O

AL DR. ALFREDO BARRIGA
Director de Proyecto de
Grado, por su ayuda y
colaboración para la
realización de este
trabajo.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

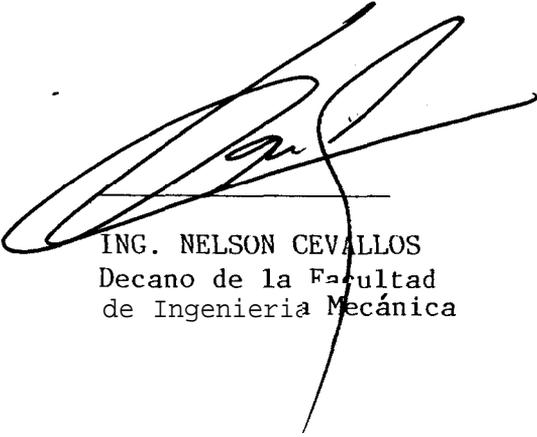
DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos; ideas y doctrinas expuestos en este Proyecto de Grado, me corresponde exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

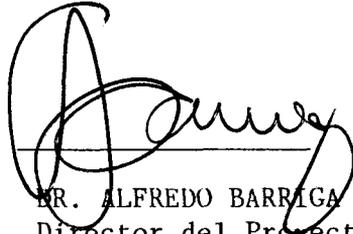
(Reglamento de Tópico de Graduación).



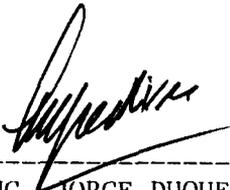
Manuel Piñero S.



ING. NELSON CEVALLOS
Decano de la Facultad
de Ingeniería Mecánica



SR. ALFREDO BARRIGA
Director del Proyecto
de Grado



ING. JORGE DUQUE
Miembro del Tribunal



ING. FRANCISCO ANDRADE
Miembro del Tribunal

INDICE GENERAL

		Pag.
INDICE GENERAL	XI	XI
INDICE DE FIGURAS	X	IX
INDICE DE TABLAS	XI	XII
NOMENCLATURA	XIV	XIV
RESUMEN	XIX	XIX
INTRODUCCION	XIX	20
CAPITULO I : FUNDAMENTOS GENERALES	XI	21
1.1 Objetivo		
1.2 Alcance		
1.3 Justificación		
CAPITULO II : FUNDAMENTOS TEORICOS		23
2.1 Deseccación de sólidos		
2.2 Condiciones internas y externas		
2.2.1 Mecanismo interno de la circulación del líquido		
2.2.2 Variables externas		
2.3 Los periodos de desecación		
2.4 Clasificación de las operaciones de secado		
2.5 Flujo en camas compactas		
2.6 Proceso del comportamiento del aire en el secado		
CAPITULO III : DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL		36

SECADOR EXPERIMENTAL

3.1 Factores de diseño

3.2 Detalles de diseño

3.3 Parámetros de diseño

3.3.1 Cálculo de la carga térmico

CAPITULO IV : PROCESO EXPERIMENTAL

4

49

4.1 Equipos e instrumentos para el control en la operación del proceso de secado

4.2 Control del proceso de secado

4.2.1 Determinación de la humedad inicial

4.2.2 Medición del flujo de aire

4.2.3 Medición de la humedad relativa del aire ambiental

4.2.4 Cálculo de la eficiencia instantánea de secado

CAPITULO V : ANALISIS DE RESULTADOS

5

72

5.1 Comportamiento de las curvas de secado

5.2 Variación de la eficiencia instantánea de secado

CAPITULO VI : CALCULOS PARA EL DISEÑO TERMICO DEL

77

SECADOR

6.1 Cálculo de la fracción vacía

6.2 Cálculo del área de la plataforma de secado

6.3 Cálculo de la capacidad necesaria del ventilador

6.3.1 Cálculo de la caída de presión estática

1977

en la cama compacta		
6.4 Cálculo de la carga térmica	93	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95	
BIBLIOGRAFIA		95

INDICE DE FIGURAS

N°	NOMBRE	PAG.
2.1	Periodos de desecación.	25
2.2	Secado por circulación transversal de lechos espesos de sólidos.	30
2.3	Proceso de calentamiento y humedecimiento del aire.	34
2.4	Diagrama físico del comportamiento de secado del grano	36
3.1	Gráfico del contenido de humedad de equilibrio en el cacao vs. humedad relativa del aire.	38
3.2	Esquema del secador experimental.	40
3.3	Volumen de control del secador experimental.	42
3.4	Secador experimental construido y funcionando.	48
4.1	Disposición para toma de valores de la velocidad.	54
4.2	Interpolación para encontrar la razón de hu-	59

11
12
13

medad del aire a la salida de la camada de cacao.

- 5.1 Partes del grano de cacao. 75
- 6.1 Esquema del secador del tipo plataforma. 77
- 6.2 Dibujo de una elipse, cuya forma es similar al grano de cacao. 82
- 6.3 Cálculo para hallar el área superficial y el volumen del grano. 82
- 6.4 Volumen de control del secador. 88
- 6.5 Gráfico de N vs H_{bh} y H_{bh} vs t , en donde se toman los valores promedios para el cálculo de la energía térmica necesaria. 90

INDICE DE GRAFICOS

N°	NOMBRE	PAG.
I	Pruebas de secado 1 y 2 (N vs H_{bh})	60 65
II	Pruebas de secado 1 y 2 (H_{bh} vs t)	60 66
III	Pruebas de secado 3,4 y 5 (N vs H_{bh})	67 67
IV	Pruebas de secado 3,4 y 5 (H_{bh} vs t)	68 68
V	Pruebas de secado 1, 2, 3, 4 y 5 (N vs H_{bh})	69 69
VI	Pruebas de secado 1, 2, 3, 4 y 5 (H_{bh} vs t)	70 70
VII	Pruebas de secado 1, 2, 3, 4 y 5 (Eficiencia instantánea vs t).	71 71

INDICE DE TABLAS

N°	NOMBRE	PAG.
I	Longitud de la resistencia eléctrica necesaria.	47
II	Valores de humedad del grano de cacao para cada prueba.	52
III	Prueba de secado 1.	60
IV	Prueba de secado 2.	61
V	Prueba de secado 3.	62
VI	Prueba de secado 4.	63
VII	Prueba de secado 5.	64
VIII	Resultados obtenidos de las pruebas de secado.	74
IX	Variación del número de Reynolds al variar el flujo de aire.	84 ^{1/2}
X	Cuadro de las caídas de presión, en función del espesor de la cama y la velocidad del aire.	86 ^{1/2}

XI Resultados concluyentes de las pruebas de secado.

93



BIBLIOTECA

NOMENCLATURA

A_e	Agua evaporada
A_p	Area de la plataforma de secado
A_t	Area de la sección transversal de la resistencia eléctrica
a_v	Superficie específica
c_p	Calor específico del aire a presión constante
d	Densidad del aire
d_{ch}	Densidad del cacao húmedo
D_p	Diámetro de la partícula
D	Diámetro equivalente
ϵ	Fracción vacía
E_i	Energía que entra
E_g	Energía que se genera
E_{st}	Energía almacenada
E_o	Energía que sale
E_{gc}	Energía generada en el periodo constante de

secado

E_{gd}	Energía generada en el periodo decreciente de secado
f	Factor de fricción
Gr	Número de Grashof
Gr_T	número de Grashof a la temperatura de película
H_{bn}	Humedad base húmeda
H_{bs}	Humedad base seca
HEC	Humedad crítica de secado
H_r	Humedad relativa del aire
H_{r1}	Humedad relativa del aire a la entrada
H_{r0}	Humedad relativa del aire a la salida
h_0	Coefficiente de convección libre
I	Intensidad de corriente eléctrica
L_v	Calor latente de vaporización
l	Longitud vertical de la pared
L	Longitud de la resistencia eléctrica
M	Masa de cacao



X(11)

r_e	Razón de humedad del aire a la salida
r_s	Razón de humedad del aire saturado
r_h	Radio hidráulico
S_p	Superficie interfacial de la partícula
T	Temperatura absoluta del aire
T_f	Temperatura de película
T	Temperatura ambiental
T_i	Temperatura del aire a la entrada
T_w	Temperatura de la pared
$T_{i,bh}$	Temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada
$T_{o,bh}$	Temperatura de bulbo seco del aire a la salida
t	Tiempo
V	Diferencia de potencial
V_p	Volumen de la partícula
V_v	Volumen de vacíos en la cama
V_t	Volumen total de la cama
V_v	Volumen de vacíos en la cama

v	Velocidad promedio del aire en la cama
v'	Velocidad superficial del aire
μ_c	Coefficiente de viscosidad cinemática
μ_d	Coefficiente de viscosidad dinámica
	Resistividad eléctrica
H_{bh}	Rango de humedad en base húmeda para el periodo constante de secado
δL	Espesor de la cama de secado
δP	Caída de presión

R E S U M E N

Para hacer el diseño de un secaduría cualquiera que sirva para secar un tipo específico de sustancia, es prioritario conocer cual es el comportamiento que tiene dicha sustancia al somerérselo a cierto tipo de secado.

Con el antecedente anterior, el primer paso consistió en buscar información referente a los rangos o condiciones de secado recomendados por los expertos dedicados al secado de cacao. Luego, en base a estas condiciones de diseño se construyó un secador experimental que permitió poder realizar pruebas de secado. Se hicieron por todo cinco pruebas, las cuales sirvieron para poder construir las curvas de secado, que son el fiel testimonio del comportamiento que tiene el grano de cacao cuando se lo está secando; a continuación se eligieron las condiciones más satisfactorias para secar. Arbitrariamente se asumió una carga a secar con 50% de humedad (base húmeda), para luego calcular el área necesaria de secado, la capacidad del ventilador requerido y el requerimiento térmico necesario.

INTRODUCCION

El cacao en un proceso natural de fermentación tiene un contenido de humedad cerca del 50% (base húmeda) que debe ser reducida a 7% antes de que el producto seco pueda ser seguramente almacenado. En regiones donde las condiciones adversas de clima no permiten el uso del secado natural, o en situaciones en que las altas producciones garantizan un mayor nivel de industrialización, el secado artificial es adoptado. Tal vez el más simple tipo de secador sea el tipo plataforma, el cual consiste en un lecho de secado, generalmente hechas de acero perforadas, soportados por paredes de madera. Un espacio debajo del lecho de secado, conocido como "Plenum" permite una distribución del flujo de aire sobre toda el área del lastre con el producto a ser secado. El flujo de aire puede ser obtenido por tiro natural o forzado. Camadas espesas de cacao pueden ser usadas en áreas relativamente pequeñas y una adecuada distribución de aire puede ser conseguida con alturas de Plenum relativamente bajas. Estos dos factores combinados posibilitan el uso de un secador tipo plataforma, compacto a bajo costo de construcción.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS GENERALES

1.1 Objetivo.

Hacer e l diseño térmico d e un secador de cacao del tipn plataforma.

1.2 Alcance.

Este trabajo está dirigido para aquellos que están vinculados con el manejo del cacao en grano , tales como pequeños y grandes productores de cacao.

1.3 Justificación.

El cacao ha sido y debe ser un producto generador d e divisas para el Ecuador ; es ta l su importancia que e n e l siglo pasado y principiode este el. pais dependió de su producción. En los actuales momentos se lo ha descuidado de tal fw-ma que su nivel de producción ha disminuído obstensiblemente, e s por este motivo que se deben implementar nuevas técnicas de producción.

Utilizándose el secado natural, el grano se seca en un periodo d e _ algunos dias si es que las condiciones del medio así lo permiten , esto es que duran te l a exposición del grano a los rayos solares, el cielo

esté completamente despejado. Con la utilización de un secador del tipo plataforma, el secado se lo hace en unas cuantas horas y sin importar que condiciones climatológicas existan en el medio ambiente. Es decir, que con la utilización del secador, el productor obtendrá un ahorro de tiempo y lo que es más importante no dependerá de las condiciones imperantes en el medio ambiente y por lo mismo podrá incrementar su producción, para beneficio del país.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Desecación de sólidos.

Desecación significa el eliminar un líquido de un sólido por procedimientos térmicos. Esta definición distingue la desecación de la extracción de la humedad de sólidos por medios mecánicos. Cuando se deseca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- 1) Transmisión de calor para evaporar el líquido, y
- 2) Transferencia de masa en humedad interna y el líquido evaporando.

Los factores que rigen la intensidad de cada uno de estos procesos son los que determinan la rapidez del proceso de desecación.

2.2 Condiciones internas y externas.

El estudio de como se seca un sólido puede basarse en el mecanismo interno de la circulación del líquido o en el efecto de las condiciones externas de temperatura, humedad, ventilación, estado de subdivisión, etc, sobre la velocidad de secado del

sólido. El primer procedimiento representa un estudio fundamental de las condiciones internas. El segundo procedimiento, aunque menos fundamental, se emplea generalmente porque sus resultados tienen aplicaciones más inmediatas (5).

2.2.1 Mecanismo interno de la circulación del líquido.

La circulación interna del líquido se produce por diversos mecanismos, según la estructura del sólido. Algunos de los mecanismos posibles son los siguientes: 1) Difusión en sólidos homogéneos-continuos, 2) Circulación capilar en sólidos granulares y porosos, 3) Circulación producida por los gradientes de d e $\text{contracción de presión}$, 4) Circulación causada por la gravedad y 5) Circulación originada por una sucesión de vaporizaciones y condensaciones.

En general, uno de dichos mecanismos predomina en un momento dado en el sólido durante su desecación, y no es raro encontrar diferentes mecanismos predominando en distintos momentos durante el ciclo de desecación (5).

2.2.2 Variables externas.

El estudio de la desecación basado en los efectos de las variables externas es el método comúnmente

empleado para investigar las características de la desecación de los sólidos. Esto se debe a que los resultados así obtenidos suelen ser directamente aplicables a l proyecto y funcionamiento de los desecadores. Las principales variables⁵ externas en cualquier estudio de desecación son la temperatura, la humedad, la ventilación, la agitación del mismo, el método para soportarlo y el contacto entre superficies calientes y el sólido húmedo. No todas estas variables se presentan necesariamente en un mismo problema.

2.3 Los periodos de **desecación**.

Cuando se seca experimentalmente un sólido, suelen obtenerse datos que relacionan el contenido de humedad al tiempo. Estos datos se transportan después para la curva de contenido de humedad (base seca) $H_{b.s.}$ en función del tiempo t como se ve en la figura 2.1.1. Estas curvas representan el caso general de un sólido húmedo que pierde humedad primero por evaporación en una de sus superficies con humedad libre, a lo que sigue un periodo de evaporación desde una superficie con agua libre de Area gradualmente decreciente, y que, finalmente se evapora al agua del interior del sólido.

La curva dN/dt en función de $H_{b.s.}$, como se ve en la

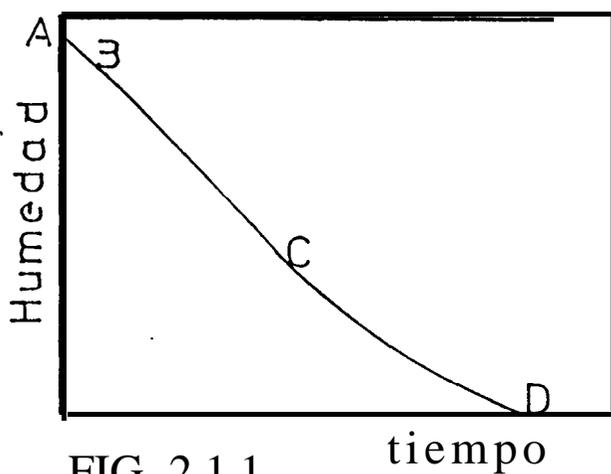


FIG. 2.1.1

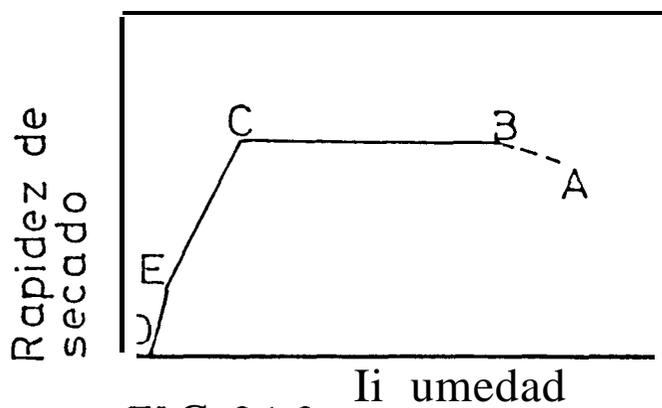


FIG. 2.1.2

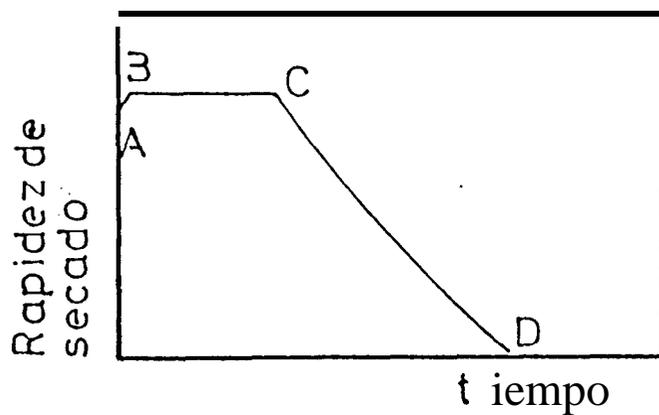


FIG. 2.1.3

FIG. 2.1 Períodos de desecación

figura 2.1.2, o dN/dt en función de t , como se ve en la figura 2.1.3. Estas curvas de intensidad muestran que la desecación no es un proceso continuo y uniforme en el cual domine un sólo mecanismo durante todo el . La sección PC de cada curva representa el periodo de intensidad constante. La porción de la curva CD en la figura 2.1.2 y 2.1.3 se caracteriza por una intensidad que varía en forma continua durante el resto del ciclo de desecación. El punto C, en el cual termina la intensidad constante y empieza a disminuir la intensidad de la desecación, se llama contenido crítico de humedad. La porción designada por AB representa un periodo de calentamiento y puede o no ser un factor importante (5).

El periodo de intensidad constante: Este periodo, de desecación se caracteriza por la evaporación desde la superficie de agua libre sobre la superficie del sólido. La intensidad de evaporación es esencialmente independiente del sólido, y la de la desecación es esencialmente equivalente a la intensidad de evaporación pat-a las mismas condiciones externas desde la superficie de una caja de agua sin ningún sólido presente. En tal caso, la intensidad de desecación la determina la rapidez con que se difunde el vapor de agua a través de la película de aire en la superficie del sólido saliendo de ella y entrando

en la masa principal de la corriente de aire. Una intensidad constante de evaporación sobre la superficie del sólido a una temperatura constante, la que en ausencia de otros efectos caloríficos, es casi la temperatura de ampolla húmeda.

Los conocimientos actuales permiten describir razonablemente bien el proceso de secado en el periodo de rapidez constante; sin embargo, aún falta mucho para comprender los periodos decrecientes de la rapidez (1).

2.4 Clasificación de las operaciones de secado.

Se clasifican en continuas y discontinuas.

Continuas.— Pasan a través del equipo tanto la sustancia a secar como el gas.

Discontinuas.— Una cierta sustancia a secar se expone a una corriente de gas que fluye continuamente, en la que se evapora la humedad. A la vez las operaciones de secado discontinuas se dividen en tangencial y transversal. En la tangencial el gas pasa paralelo a la sustancia a secar y en la transversal el flujo del gas es perpendicular a la sustancia.

Secado por circulación transversal.

Considérese el caso en que el lecho de sólidos tienen un espesor apreciable con respecto al tamaño de las partículas, como en la figura 2.2. La evaporación de la humedad no contenida hacia el gas ocurre en una zona relativamente estrecha que se mueve lentamente a través del lecho; a menos que el lecho se caliente internamente, el gas que sale de esta zona está, para todos los fines prácticos, saturado a la temperatura de saturación adiabática del gas entrante. Esta temperatura también es la temperatura superficial de las partículas húmedas. La rapidez de secado empieza a decaer debido a que el gas ya no sale en una condición saturada. En el caso de lechos delgados compuestos de partículas grandes, desde el principio el gas sale insaturado del lecho empero, mientras cada una de las superficies de las partículas permanezca completamente húmeda, se tendrá un periodo de rapidez constante. Entonces el periodo decreciente de la rapidez empieza cuando se termina la humedad superficial (1).

Flujo en camas compactas.

Para facilidad de cálculo se asume que el paquete en todas partes es uniforme.

Flujo laminar en camas compactas. Cierta geometría

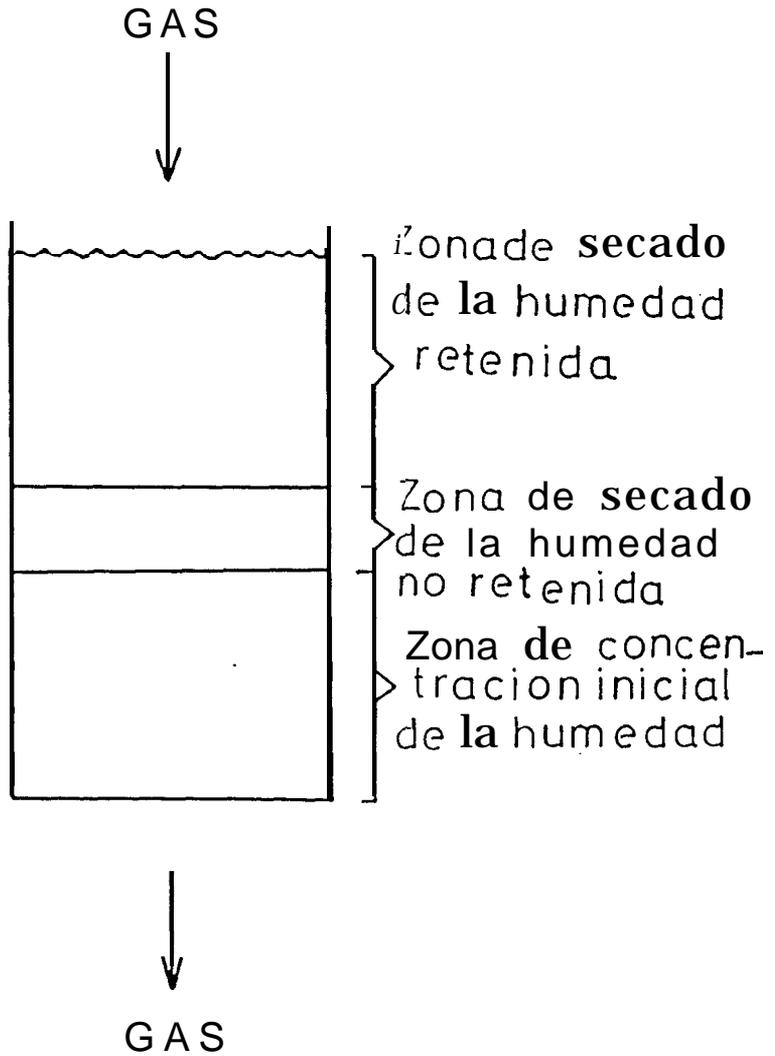


FIG. 2.2 **Secado** por circulación transversal de lechos espesos de sólidos

relacionada para camas compactas son usadas en las derivaciones para flujo. La fracción vacía E en una cama compacta es definida como:

$$E = \frac{\text{Volumen da vacíos en la cama}}{\text{Volumen total de la cama (vacíos + sólidos)}}$$

$$E = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.1)$$

La superficie específica de una partícula es definida como:

$$a_v = \frac{S_p}{V_p} \quad (2.2)$$

donde:

S_p = Superficie interfacial de la partícula

V_p = Volumen de la partícula

Por lo que $(1 - E)$ es la fracción vacía del volumen de partículas en la cama.

$$a = a_v (1 - E) \quad (2.3)$$

La velocidad promedio en la cama es v , y está relacionada a la velocidad superficial v' (basada en la sección transversal del recipiente vacío) por:-

$$v' = E v \quad (2.4)$$



El radio hidráulico r_h para flujo es definido como sigue:

$$r_h = \frac{\text{Area de la sección transversal disponible para el flujo}}{\text{Perímetro mojado}}$$

$$r_h = \frac{\text{Volumen de vacíos disponible para el flujo}}{\text{Superficie total mojada de sólidos}}$$

$$r_h = \frac{\text{Volumen de vacíos} / \text{Volumen de la cama}}{\text{Superficie mojada} / \text{Volumen de la cama}}$$

$$r_h = E / a \quad (2.5)$$

Para un canal, el diámetro equivalente es $D = 4 r_h$.

El Re para una cama compacta es como sigue:

$$v' = E v$$

$$Re = \frac{4 r_h v d}{\mu_a} = \frac{4 r_h v'}{E \mu_c}$$

$$Re = \frac{4 E v' d}{a E \mu_a} = \frac{4 E v'}{a E \mu_c} \quad (2.6)$$

De la referencia (2), combinando la ecuación (2.1) y el hecho de que $D = 4 r_h$.

$$\int P = \frac{32 a v \int L}{D^2} = \frac{32 a (v'/E) \int L}{(4 r_h)^2}$$

donde:

$\int L$ = Espesor de la cama

$\int P$ = Caída de presión estática

μ_d = Coeficiente de viscosidad dinámica

Esto es válido para $Re < 10$ y $E < 0.5$.

Flujo turbulento en camas compactas.— Así mismo, de la referencia (2):

$$\int P = \frac{3 f (v) \int L (1 - E)}{D_p E^3}$$

Donde f es el factor de fricción y D_p es el diámetro de la partícula. Datos experimentales indican que $3f = 1.75$, por lo que para flujo turbulento, o sea, $Re > 1000$, la ecuación anterior queda:

$$\int P = \frac{1.75 (v') \int L (1 - E)}{D_p E^3}$$

Aquí el valor de la densidad se lo toma como un promedio de la temperatura entre el valor de entrada y de salida. La siguiente ecuación sirve para bajo, medio y alto flujo:

$$\int P = \frac{32 \mu_d (v'/E) \int L}{(4 r_h)} + \frac{1.75 (v') \int L (1 - E)}{D_p E^3} \quad (2.7)$$

2.6 Proceso de comportamiento del aire en el secado.

En la figura 2.3 se muestra en una carta

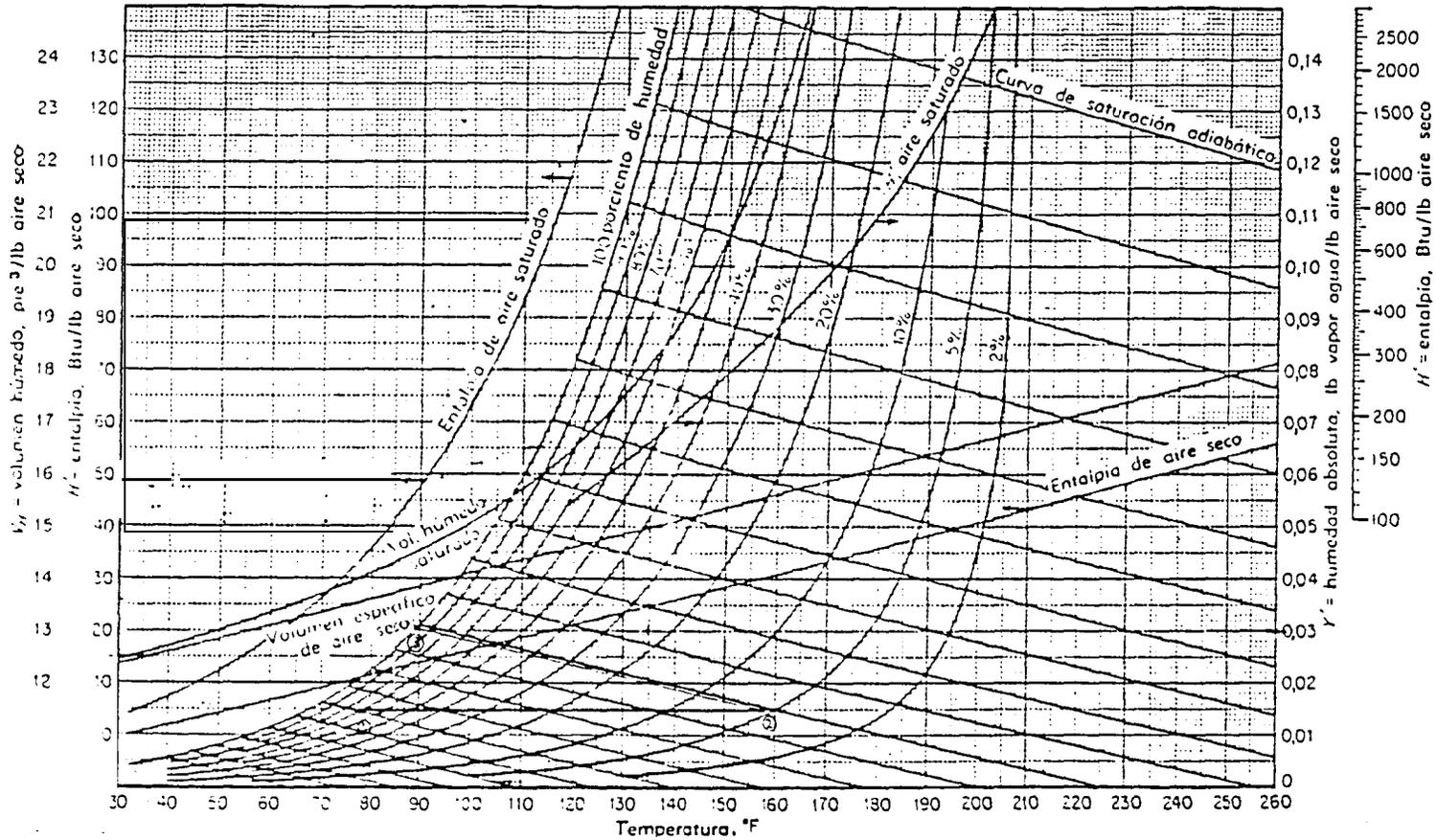


FIG. 2 3 Proceso de calentamiento y humidificación del aire (ref. 1)

psicrométrica cual es el comportamiento que tiene el aire cuando se lo calienta y pasa a través de una cama de secado. De la figura 2.3, en el punto 1, la temperatura y humedad **r-elativa** del aire es 25 °C y 70% respectivamente. Luego, en el punto 2, la temperatura será de 70 °C y 7% de humedad. Luego de pasar por la cama compacta, asumiendo un proceso adiabático de 2 a 3 y que el aire sale completamente saturado, entonces la temperatura del aire descenderá a unos 32 °C.

La figura 2.4 muestra como se comporta la temperatura y la humedad absoluta con respecto al espesor del lecho; tomando los valores de la figura 2.3, el aire se satura a 32 °C y 0.031 Kg vapor / kg aire seco; esto suele ocurrir en el primer instante que pasa el aire por el lecho espeso, pero a medida que pasa el tiempo la temperatura y la humedad tienden a ser igual a su valor de entrada, que será cuando el grano ya no posea humedad. Entonces es fácil suponer que mientras más espeso sea el lecho, más tiempo le tomará en secarse. Suponiendo el ingreso del aire a 70 °C y con cierto flujo, entonces habrá un espesor óptimo de secado que será cuando el periodo constante de secado sea el que predomine en el tiempo total de secado.

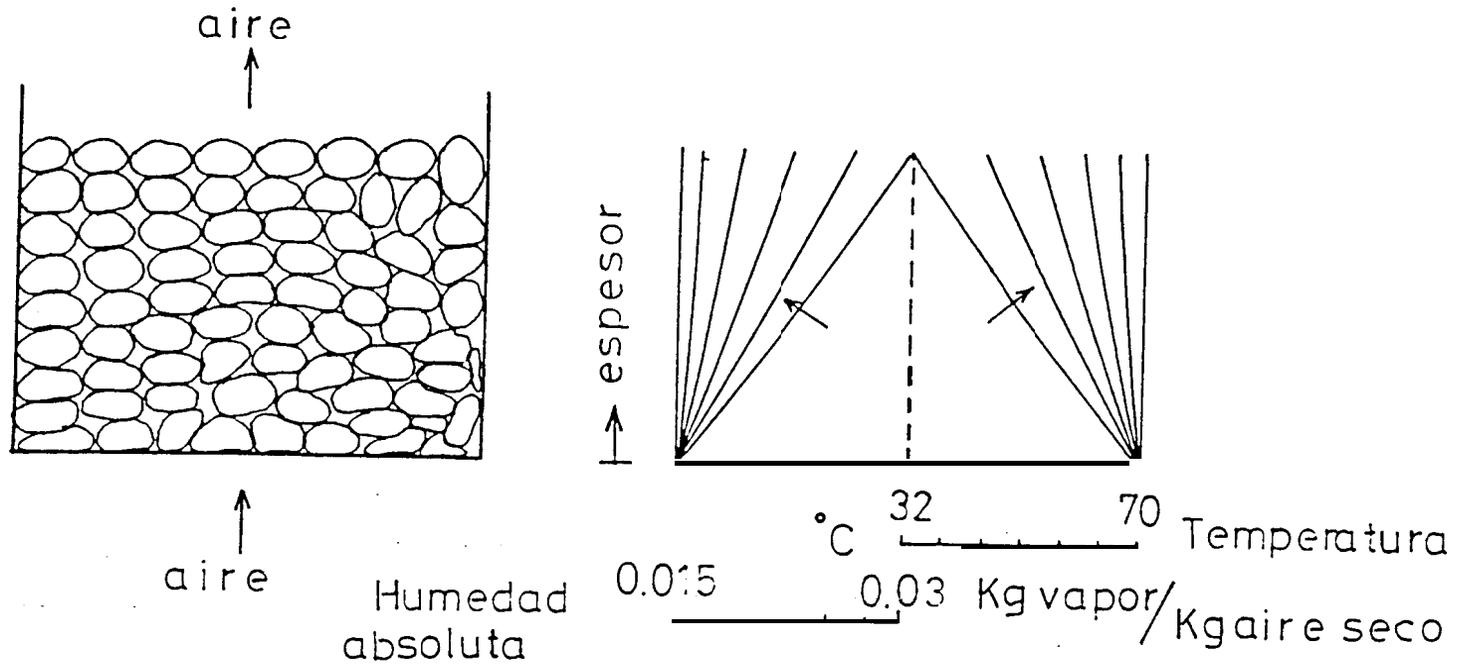


FIG.2.4 Diagrama fisico del comportamiento de secado de grano

CAPITULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SECADOR EXPERIMENTAL

3.1 Factores de diseño.

De la figura 3.1, en donde se grafica el contenido de humedad de equilibrio del cacao versus humedad relativa del aire, se tiene como parámetro la temperatura del air-e; se puede observar como disminuye el contenido de humedad de equilibria al elevarse la temperatura del. aire. Si par ejemplo se desea saber cual será el contenido crítico de humedad para una temperatura del air-e de 25 °C, y par-a una humedad relativa del 70 % ;interpolando en la figura 3.1 se obtiene un valor alrededor de 10 % . Si la temperatura del aire subiera a 45 °C y bajo las mismas condiciones de humedad relativa, el contenido de humedad de equilibrio sería de 6%. Se desprende entonces que para temperaturas de aire mayores a 45 °C y humedades relativas del aire mayores a 70 % se podrán obtener fácilmente valores inferiores al 6% de contenido de humedad de equilibrio.

Los diferentes autores dedicados al estudio del secado del grano de cacao (6), recomiendan temperaturas para el aire de secado que oscilen entre

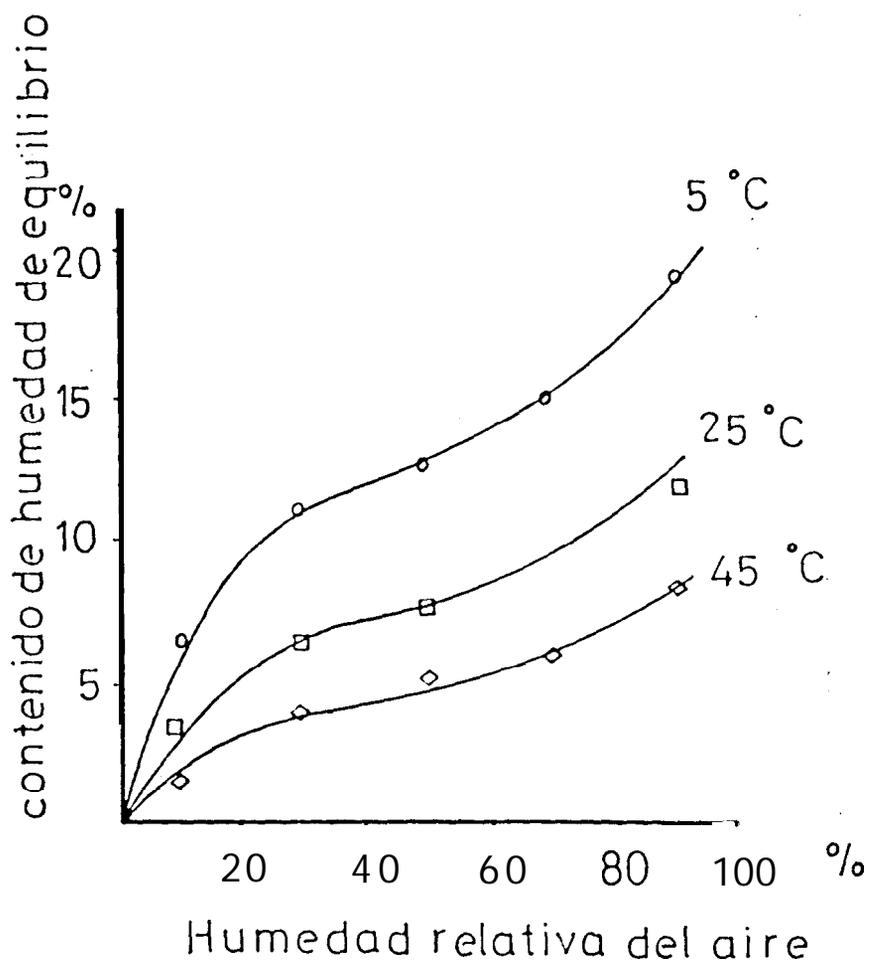


FIG. 3.1 Gráfico de conteúdo de humidade relativa do ar e. (Tomado de 5)

39

los 60 a 80 °C, nunca superiores a 80 °C porque lo que se obtendría con ello es quemar el grano.

En la Costa Ecuatoriana las personas que secan al cacao artificialmente utilizan temperaturas de aire de secado que oscilan entre los 55 a 60 °C. Para las pruebas de secado se utilizó el aire a 60 °C y a 75 °C.

Los expertos de secado de cacao recomiendan usar velocidades de aire relativamente bajas, por cuanto así se evita el aplastamiento de las almendras.

Ten iéndose en conocimiento todos estos tres parámetros, esto es, temperatura, velocidad del aire y espesor de la cama compacta, se procedió a hacer el diseño de l secador ex perimen ta l .

La energía requerida en el proceso de secado debe ser scrbdividida en energía mecánica, pat-a accionar un ventilador, y d e calor par-a elevar elevar la temperatura del air-e de secado.

3.2 Detalles de diseño.

En la figura 3.2 se muestra el esquema del secador experimental. Este tamaño del secador es suficiente para poder hacer pruebas y obtener resultados válidos y prácticos.

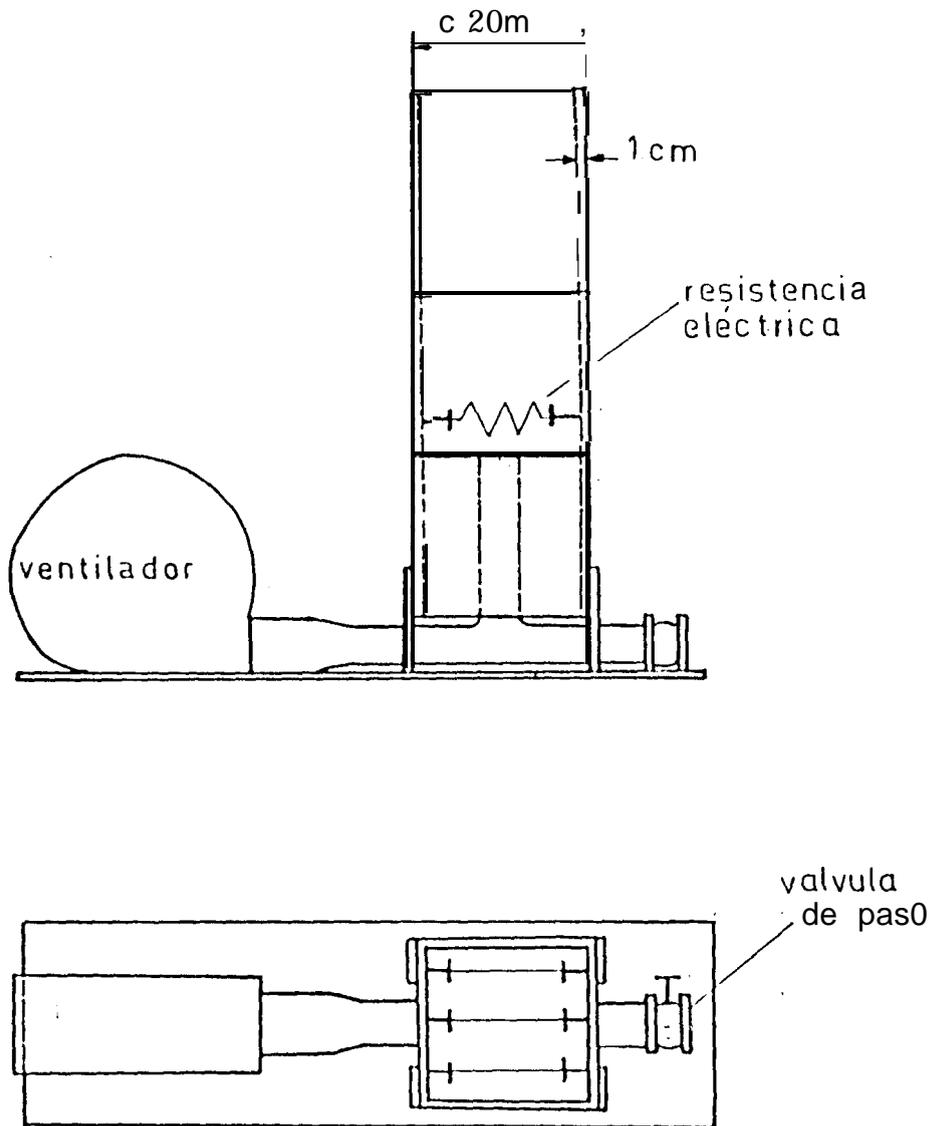


FIG. 3.2 Esquema del secador experimental

El sistema de secado en sí, es muy sencillo pues consta básicamente de: un ventilador centrífugo que fuerza el aire a pasar a través de la cama; una resistencia eléctrica que calienta el aire, un recipiente que aísla el flujo de air-e y a la vez otro aparte que contiene el grano; y por último una válvula de paso que permite variar el flujo de aire.

3.3 Parámetros de diseño.

Los parámetros que se van a tener en cuenta al hacer el diseño del secador experimental son velocidad y temperatura del aire. Se hicieron las pruebas con 0.03 y 0.144 m/s de velocidad del aire a 75 °C y 0.26 m/s a 60 °C.

3.3.1 Cálculo de la carga térmica.

Haciendo un volumen de control en la figura 3.3, se puede hacer un balance de energías y encontrar cual es el requerimiento térmico.

$$E_1 - E_o + E_g = E_{\text{net}}$$

En condiciones de estado estable, $E_{\text{net}} = 0$

Aquí:

E_1 = Energía que entra al volumen de control

E_o = Energía que sale del volumen de control

E_g = Energía que se genera dentro del volumen

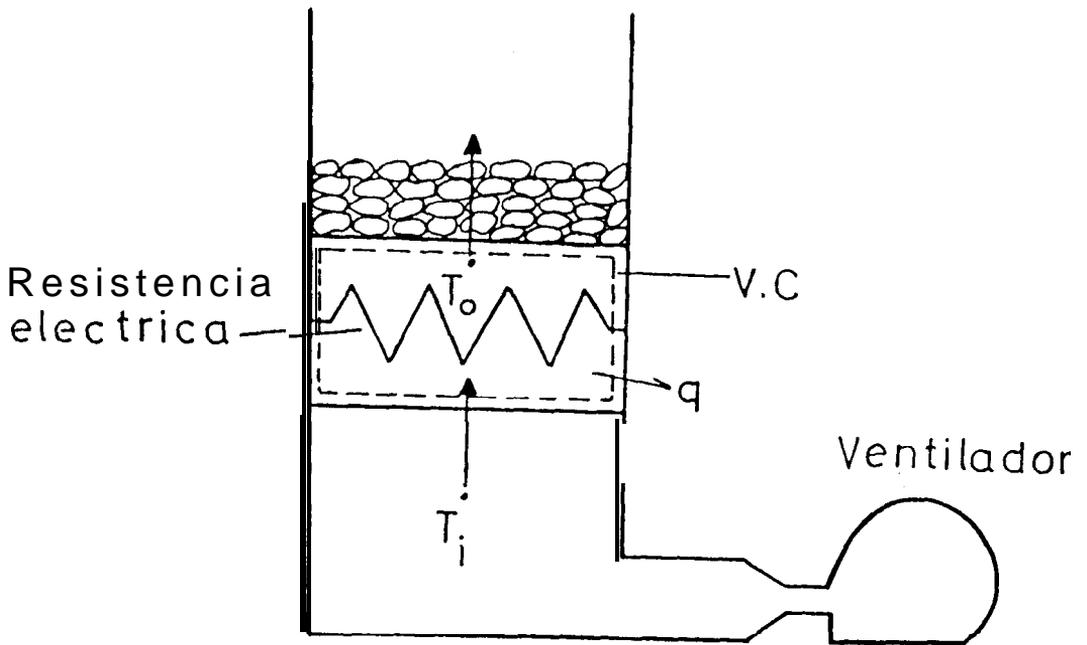


FIG. 3.3 Volumen de control del secador experimental

4 >

de control

E_{st} = Energía que se almacena en el volumen de control

En definitiva, la ecuación de arriba queda como

$$E_o = m c_p (T_o - T_i) + q$$

donde:

q = calor que sale de las paredes, [Watt]

$$q = h_o A (T_w - T)$$

Aquí:

T_o = Temperatura del aire al salir del volumen de control, [°C]

h_o = Coeficiente de convección libre, [Watt/m² - °C]

T_w = Temperatura de la pared exterior del secador donde se encuentran las resistencias eléctricas, [°C]

$T_i = T$ = Temperatura del aire ambiente, [°C]

m = Flujo másico del aire a la temperatura promedio del aire, [kg/s]

c_p = Calor específico del aire a la temperatura promedio del aire, [Watt/kg-°C]

A = Area de la superficie del volumen de control, [m²]

$$A = 20 \times 10 \times 4 \times 10^{-4} = 0.08 \text{ m}^2$$

Siendo la convección libre la forma de transferencia de calor que predomina entre la superficie externa del secador y el medio ambiente, entonces el h_o se lo puede calcular usando la correlación dada en la referencia (5), y es como sigue:

$$h_o = 1.42 (\Delta T/l) \quad \text{para } 10^4 < Gr_f Pr_f < 10^9$$

$$h_o = 0.95 (\Delta T)^{1/3} \quad \text{para } Gr_f Pr_f > 10^9$$

Aquí Gr_f es el número de Grashof a la temperatura de película y Pr_f es el número de Prantdl a la temperatura de película; el ΔT es la diferencia de temperatura entre la pared y el medio y está dada en °C; l es la longitud vertical de la pared, dado en metros; el h_o estará dado en $\text{Watt/m}^2 \cdot \text{°C}$.

La temperatura de la pared va a hacer estimada en 60 °C, esta estimación se la puede hacer por cuanto el valor de h_o que se calcula con las correlaciones dadas arriba no diferiran en nada al usarse temperaturas relativamente bajas para el aire.

$$\text{Temperatura de pared estimada} = T_w = 60 \text{ °C}$$

$$\text{Temperatura media ambiente} = T = 27 \text{ °C}$$

$$\text{Temperatura de película} = T_f = \frac{27 + 60}{2}$$

$$l = 0.15 \text{ m}$$

Para aire a 110 °F, en la tabla A-3 de la referencia (8), $Pr_r = 0.72$

$$\frac{g \beta d}{\mu_a} = 3.16 \times 10^6 / \text{°F-pie}$$

$$\text{siendo } Gr_r = \frac{g \beta d \delta T}{(\mu_a)^2}$$

$$Gr_r = 7.2 \times 10^6$$

Entonces la correlación a usarse será:

$$h_o = 1.42 (\delta T / l)^{1/4} = 1.42 [(53 - 27) / 0.15]^{1/4}$$

$$h_o = 5.5 \text{ Watt} / \text{m}^2 \text{ -}^\circ\text{C}$$

Por lo que:

$$q = 3.5 \times 0.08 \times 26$$

$$q = 8 \text{ Watt}$$

El valor de $c_p = 1 \text{ Joule/kg-}^\circ\text{K}$ para una temperatura de 320 °K. También se sabe que $E_g = IV$ y $E_g = I^2 R$, donde:

I = Intensidad de corriente, [A]

V = Diferencia de potencial = 110 V

R = Resistencia eléctrica, [ohm]

También, $R = \rho L / A_c$

donde:

Ω = Resistividad eléctrica

L = Longitud de la resistencia

A_t = Area de la sección transversal de la
resistencia

Se usó un material cuya resistividad es de 1.13×10^{-4} ohm-m y $A_t = 0.636 \text{ cm}^2$. Los resultados se muestran en la tabla I.

En las fotografías mostradas en la figura 3.4 se puede observar el secador experimental ya construido.

TABLA I

LONGITUD DE LA RESISTENCIA ELECTRICA NECESARIA

Vel. del aire [m/s]	$m = vA \cdot d$ [kg/s]	T_c [°C]	E_g [Watt]	I [A]	R [ohm]	L [m]
0.03	1.22×10^{-3}	75	69.76	0.63	175.76	98.92
0.14	5.86×10^{-3}	75	541.05	4.92	22.35	12.58
0.26	0.011	60	381.26	3.47	31.66	17.81

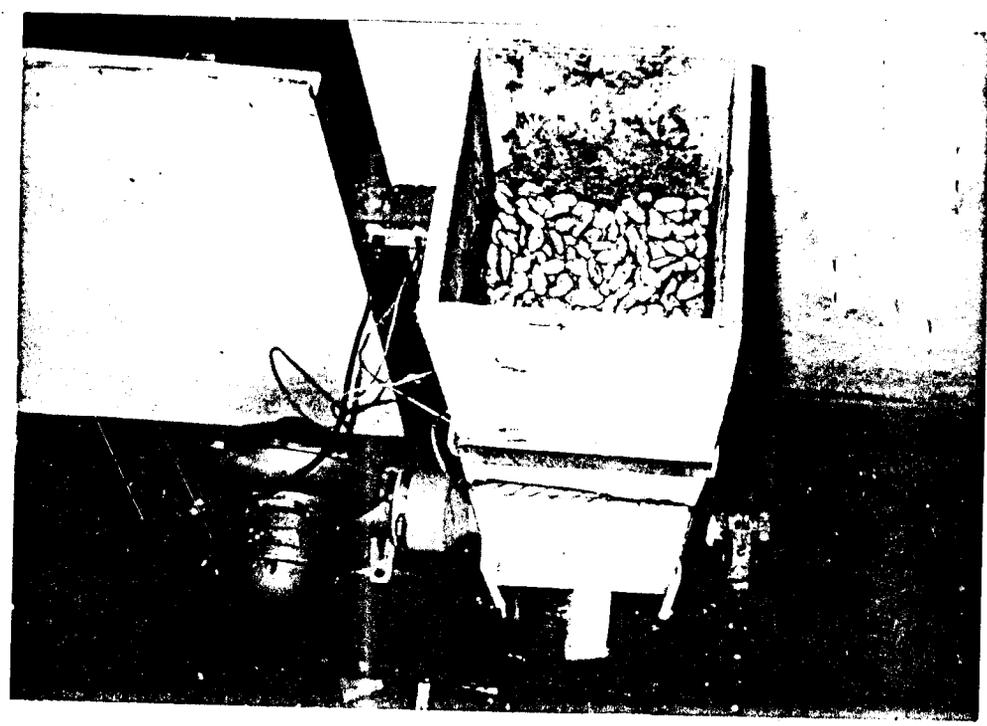
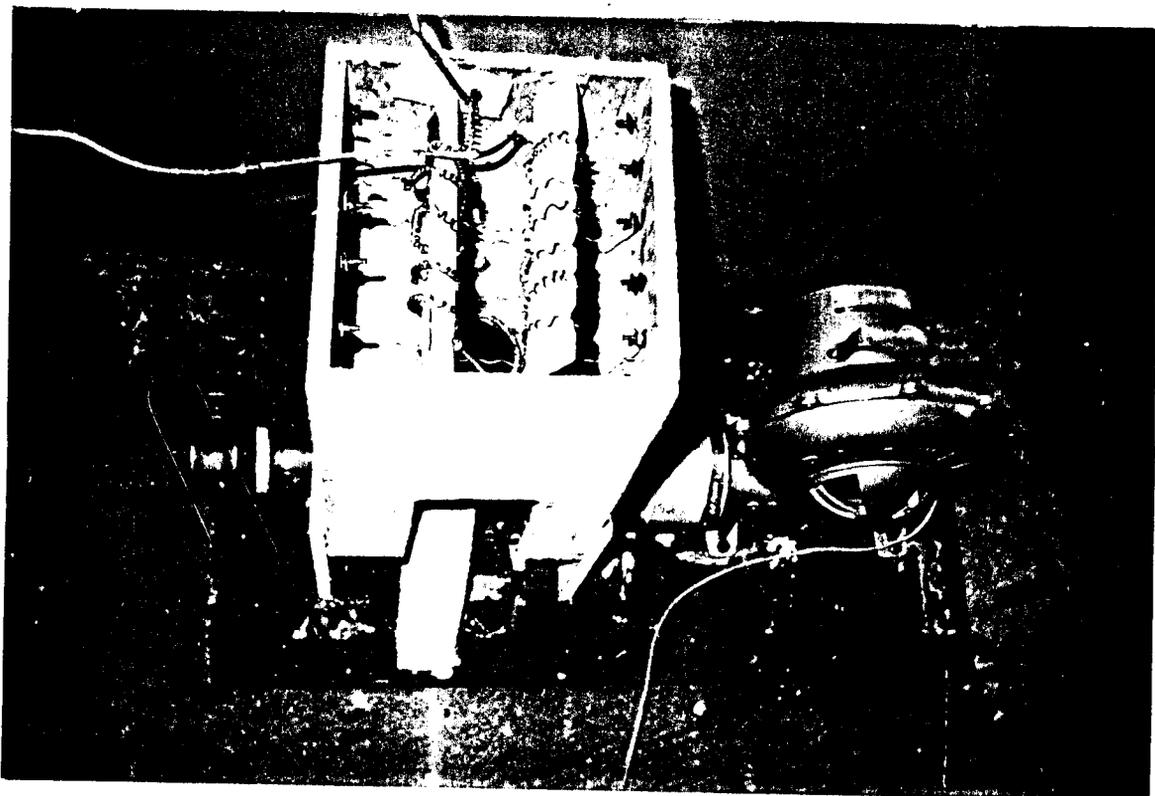


FIG. 3.4 Secador experimental construido y funcionando

CAPITULO IV

PROCESO EXPERIMENTAL

Equipos e instrumentos para el control en la operacion del proceso de secado.

Se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos:

- Una balanza METO del tipo automática, con una capacidad de hasta 20 kg y una precisión de ± 5 g. Sirvió para pesar el cacao a lo largo del proceso.
- Un medidor de humedad BACHARACH del tipo manual con una precisión de $\pm 2\%$. Con él se midieron las temperaturas del bulbo seco, bulbo húmedo y humedad relativa del aire.
- Un termómetro TECHNOTERM 9361 tipo K automático, con una capacidad de 20 hasta 200 °C. Sirvió para medir la temperatura del aire a la entrada y a la salida.
- Un medidor de flujo portátil marca AD, con una precisión de ± 1 mm. Con él se pudo calcular el flujo de aire.
- Una estufa de laboratorio marca MEMMERT, con una

50

capacidad de hasta 300 °C y una precisión de ± 10 °C. Sirvió para obtener los valores de humedad inicial en el cacao.

- Una balanza marca OHAUS, con una capacidad de hasta 3 lb. 2 onz y una precisión de ± 0.1 g. Con el se pesó el grano para hacer las pruebas en la estufa.

4.2 Control del proceso de secado.

Antes de hacer cada prueba de secado, se cogieron pequeñas muestras para poder determinar la humedad inicial del grano. Luego para saber como iba variando la humedad en el grano con el paso del tiempo, se pesaba cada cierto tiempo el recipiente y el grano que contenía dicho recipiente. Eventualmente se midieron los valores de temperatura de bulbo húmedo, de bulbo seco y de humedad relativa del aire que existía en el medio ambiente en el momento de la prueba.

También se registraron los valores de temperatura del aire a la entrada y a la salida de la cama de granos. Con la ayuda del medidor de flujo, se pudo medir la velocidad del aire.

4.2.1 Determinación de la humedad inicial

51

Para saber cual es la humedad que posee el grano antes de someterlo al secado, se utilizó una estufa, en donde se introdujo una muestra de granos, que fueron sometidos a una temperatura de 110 °C. Se dejó a la muestra por lo menos cuatro horas secándose en la estufa, hasta el punto en que no tuviera agua. La diferencia de masa de la muestra antes y después de haberla metido a la estufa, sirvió para saber cual ha sido la cantidad de agua presente en la muestra. Por ejemplo, para la primera prueba, este es el procedimiento ~~la~~ seguir:

Masa de la muestra al inicio = m_i = 167.0 g

Masa de la muestra el final = m_f = 90.5 g

Humedad inicial (base húmeda) = H_{bh}

$$f_{bh} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de agua} + \text{masa del sólido}}$$

$$H_{bh} = \frac{167.0 - 90.5}{167.0} \times 100$$

$$H_{bh} = 45.8 \%$$

De igual manera, se hizo para las otras pruebas. Los resultados se los muestra en la Tabla II.

.2.2 Medición del flujo de aire.

52

TABLA II

VALORES DE HUMEDAD DEL GRANO DE CACAO PARA CADA PRUEBA

Prueba	m_i [g]	m_f [g]	H_{bh} [%]	H_{bs} [%]
1	167.0	90.5	45.8	84.5
2	172.1	86.0	50.0	100.0
3	128.6	63.7	50.5	102.0
4	128.6	63.7	50.5	102.0
5	107.4	55.3	48.5	94.2

53

Con la ayuda del medidor de flujo portátil se midieron los flujos de aire para cada prueba. La presión de velocidad será la diferencia entre la presión total y la presión estática. Según haya sido la posición en se encontraba el medidor al momento de hacerse la medición, se utilizaba un factor de conversión provisto en el aparato por el fabricante. Para hacer las pruebas es necesario tomar las siguientes precauciones:

- 1.- Ducto de diámetro 2 " o menor.
- 2.- Hacer un exacto cruce como se indica en la figura 4.1, de izquierda a derecha y de arriba a abajo. Tomar un promedio de lecturas.
- 3.- Proveer de un ducto plano y recto de sección de diez diámetros en longitud corriente arriba y abajo del tubo de pitot.

La velocidad del air-c será igual a:

$$\text{Velocidad del aire} = 5.56 \frac{P_v}{d} \quad [\text{m/s}] \quad (4. a.)$$

$$d = 1.325 P_b / T$$

donde:

, P_v = Presión de velocidad, [pulg. de agua]

d = densidad del air-e , [lb/ft³]

P_b = Presión barométrica = 29.98 pulg Hg

T = Temperatura absoluta del aire, [$^{\circ}$ F]

Así por ejemplo, para la primera prueba, el cálculo se hizo de la siguiente manera: Para la posición en que el factor de conversión es igual a 0.05 y con una presión de referencia leída en el aparato al nivelarlo de - 8 nun, se tomaron los siguientes valores en mm:

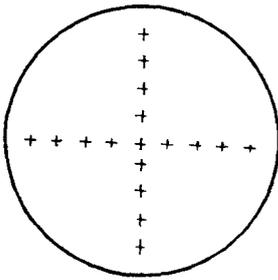


FIG. 4.1 Disposición para toma de valores de velocidad

$P_1 = 26$	$P_{1'} = 25$
$P_2 = 24$	$P_{2'} = 24$
$P_3 = 23$	$P_{3'} = 22$
$P_4 = 21$	$P_{4'} = 20$
$P_5 = 25$	$P_{5'} = 26$
$P_6 = 24$	$P_{6'} = 24$
$P_7 = 23$	$P_{7'} = 23$
$P_8 = 22$	$P_{8'} = 21$

55

$$\sum_{i=1}^n P_i = 353 / 16 = 22.06$$

$$PV = (22.06 + 16 \times 8) \times 0.05$$

$$PV = 1.56 \text{ mm de agua} = 0.062 \text{ pulg de agua}$$

De la ecuación (4.2):

$$d = \frac{1.325 \times 29.98}{460 + \frac{(60 + 28)}{2} \times 1.8 + 32}$$

$$d = 0.069 \text{ lb} / \text{ft}^3$$

De la ecuación (4.1):

$$v = 5.56 PV / d$$

$$v = 5.56 \times \frac{0.062}{0.069}$$

$$v = 5.27 \text{ m/s}$$

Siendo caudal $Q = \text{Area transversal del ducto} \times v$

$$Q = \frac{\pi (2 \times 2.5 \times 10^{-2})^2}{4} \times 5.27$$

$$Q = 0.011 \text{ m}^3/\text{s}$$

La velocidad del aire a la entrada de la cama será entonces:

$$v' = Q / \text{Area transversal de la cama}$$

$$v' = 0.011 / 0.037$$

$$v' = 0.297 \text{ m/s}$$

El mismo procedimiento se sigue pat-a los otros dos flujos, que son:

$$v'_2 = 0.03 \text{ m/s}$$

$$v'_3 = 0.144 \text{ m/s}$$

Medición de la humedad relativa del air-e ambiental.

Se lo hizo con el medidor de humedad. El procedimiento que se siguió fue:

- 1.- Se moja el bulbo húmedo con agua destilada.
- 2.- Durante tres minutos se da vueltas al medidor.
- 3.- Se toman los valores de temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo.
- 4.- Con los valores de temperatura anteriores se obtienen los valores de humedad relativa.

Las diferentes lecturas que se hicieron se encuentran en las Tablas III, IV, V, VI, VII.

Cálculo de la eficiencia instantánea de secado.

Para comparar la eficiencia de secado durante toda una prueba, un valor de eficiencia instantánea es necesario, esta puede ser definida como la razón

entre las cantidades de agua capturadas por el aire, durante su paso por el lecho de granos y la cantidad total que puede ser removida por el aire en estado de saturación y puede ser calculado así:

$$N_1 = \frac{r_s - r_a}{r_b - r_a} \quad (4.3)$$

Donde:

r_s = razón de humedad del aire en la salida de la camada de cacao

r_a = razón de humedad del aire de entrada

r_b = razón de humedad del aire saturado a la misma temperatura de bulbo húmedo del aire de salida

Las eficiencias para cada prueba se calcularon usando los datos que se encuentran en las Tablas III, IV, V, VI, VII. La intersección entre la temperatura de bulbo seco del aire a la salida de la cama y la paralela a la curva de saturación adiabática (que se trazó a partir de la temperatura a que se ha calentado el aire) dará la humedad r_s . Por ejemplo, en la tercera prueba a los 96 minutos, las condiciones del aire fueron:

$$r_s = 0.04$$

$$r_b = 1.00$$

La temperatura del aire a la salida fue de 60 °C; en la figura 4.2 se muestra como se encuentra r_{a2} . Luego reemplazando en la ecuación 4.3:

$$N_1 = \frac{0.15 - 0.04}{1.00 - 0.04} \times 100 = 11 \%$$

De la misma manera se hace para calcular los otros valores. En las Tablas III, IV, V, VI, VII, se tabulan los valores de humedad del aire a la salida del secador como de la eficiencia instantánea.

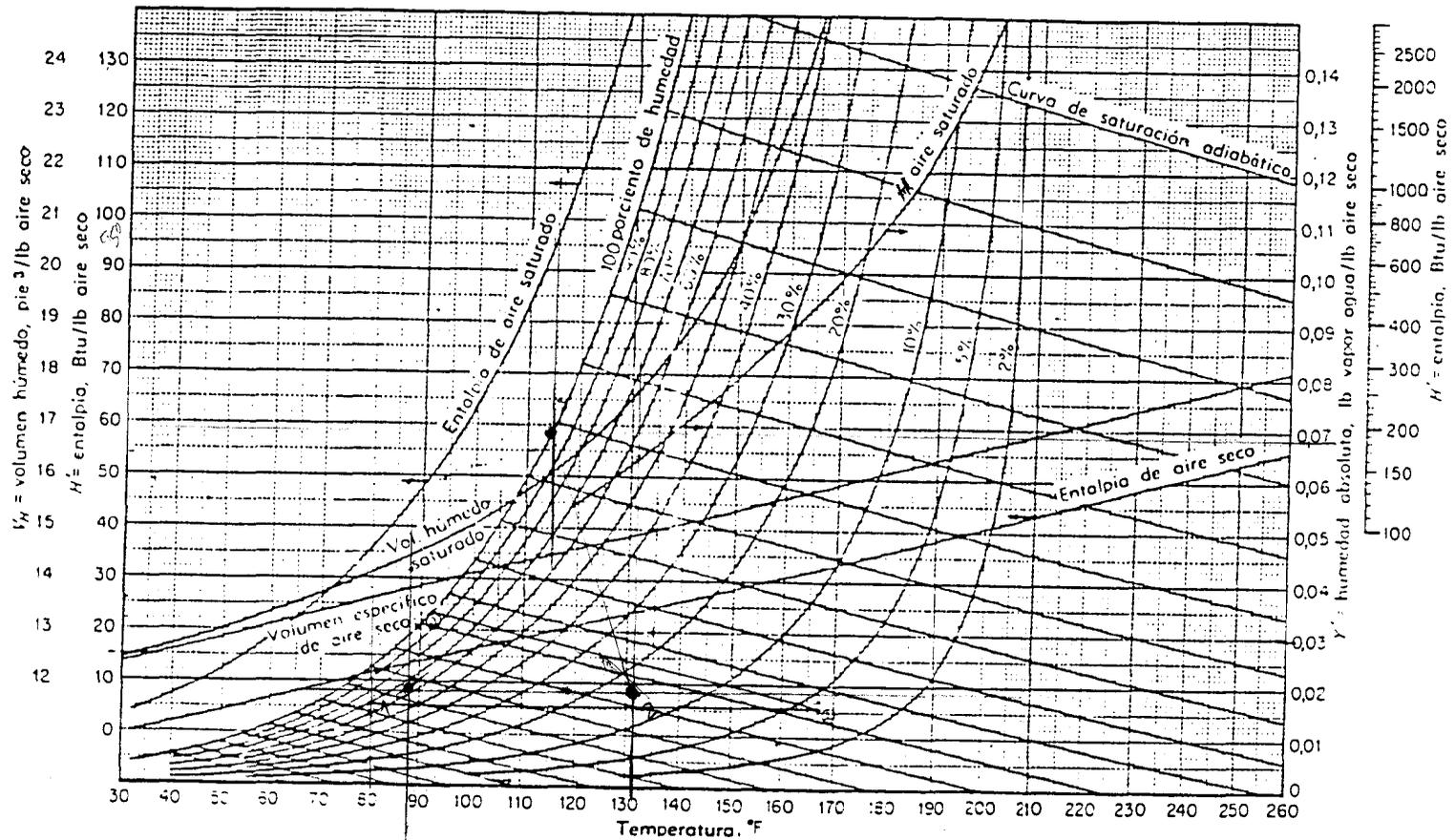


Diagrama psicrométrico para aire-vapor de agua, 1 atm abs.

FIG. 4.2 Interpolación para encontrar la razón de humedad del aire a la salida de la camada de cacao

TABLA III

PRUEBA DE SECADO 1

Velocidad del aire = 0.28 m/s

Temperatura del aire = 80 °C

Espesor de la cama = 8.3 cm

PRUEBA DE SECADO

t	P	A.E	N .	Hbh	To	Tib _m	Tibh	HR ₁	HR ₀	N ₁
[min]	[kg]	[kg]	[kg/m ² ·min]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]
0	2.130	0.00	0.000	45.81	30	27	2 3	72	100	100
48	1.840	0.29	0.170	37.20	48	27	23	72	30	22
81	1.830	0.50	0.221	29.19	51	27	23	72	25	17
88	1.5%	0.58	0.227	27.24	51	27	23	72	25	17
71	1.550	0.58	0.221	25.55	51	27	23	72	25	17
76	1.525	0.81	9.215	24.33	51	27	23	72	25	17
81	1.510	0.82	0.207	23.58	51	27	23	71	25	17
88	1.505	0.83	0.108	23.32	51	27	23	71	25	17
91	1.490	0.84	0.190	22.55	52	27	23	71	25	17
98	1.480	0.85	0.183	22.03	52	27	23	71	20	17
106	1.485	0.87	0.189	21.23	52	28	23	68	20	11
118	1.450	0.8%	0.158	20.41	52	28	23	68	20	11
128	1.433	0.70	0.149	19.47	52	2%	23	88	20	11
148	1.413	0.72	0.133	18.30	52	29	23	88	20	11
171	1.385	0.75	0.118	18.88	52	29	23	88	20	11
192	1.375	0.78	0.108	18.07	52	29	23	88	20	11
211	1.380	0.77	0.099	15.15	52	28	23	88	20	11
232	1.345	0.79	0.091	14.20	53	28	23	88	19	10
258	1.335	0.80	0.084	13.58	53	28	23	70	19	10
286	1.325	0.81	0.078	12.91	53	28	23	70	19	10
306	1.985	0.83	0.073	11.57	54	28	23	70	18	7
334	1.295	0.84	0.088	10.89	54	28	23	70	16	7
358	1.290	0.84	0.664	10.54	54	28	23	70	18	7
384	1.275	0.85	0.060	9.83	55	28	24	73	14	4
534	1.207	0.88	0.040	8.85	55	28	24	73	14	4
588	1.185	0.89	0.042	7.18	55	28	24	73	14	4
571	1.118	0.89	0.042	8.88	55	24	24	76	14	4
828	1.155	0.91	0.039	4.90	55	24	24	78	14	4
888	1.113	0.94	0.037	3.31	55	24	24	76	14	4
745	1.120	0.95	0.034	2.20	55	22	25	77	14	4

TABLA IV

PRUEBA DE SECADO 2

Velocidad del aire = 0.26 m/s
 Temperatura del aire = 60 °C
 Espesor de la cama = 4.6 cm

t	P	A.E	N	H _{bh}	To	T _{bs}	T _{bh}	HR _i	HR _o	N _i
[min]	[kg]	[kg]	[kg/m-min]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]
0	1.013	0.000	0.000	50.00	33	27	23	72	85	100
13	0.863	0.150	0.312	41.30	40	27	23	72	50	44
30	0.785	0.228	0.205	35.50	48	27	23	72	30	22
45	0.765	0.248	0.149	33.80	51	27	23	72	25	17
62	0.738	0.275	0.119	31.40	51	27	23	72	25	17
80	0.725	0.288	0.097	30.20	52	27	23	72	20	11
106	0.708	0.305	0.078	28.40	52	26	23	75	20	11
132	0.695	0.318	0.065	27.20	52	26	23	75	20	11
175	0.670	0.343	0.053	24.40	52	26	23	75	20	11
201	0.660	0.353	0.047	23.30	52	26	23	75	20	11
236	0.650	0.363	0.042	22.10	52	26	23	75	20	11
288	0.635	0.378	0.035	20.30	52	26	23	77	20	11
313	0.630	0.383	0.033	19.60	52	25	22	78	20	11
336	0.623	0.390	0.031	18.70	53	27	22	72	19	10
371	0.615	0.398	0.029	17.70	53	27	22	72	19	10
411	0.605	0.408	0.027	16.30	53	28	22	66	19	10
425	0.603	0.410	0.026	15.90	53	28	23	66	19	10
491	0.568	0.445	0.024	10.80	53	28	23	66	19	10
541	0.555	0.458	0.023	8.80	53	29	23	66	19	10
568	0.570	0.463	0.022	7.90	54	29	23	65	16	7
598	0.543	0.490	0.022	3.10	55	28	23	68	14	4
642	0.540	0.493	0.021	2.60	55	28	23	68	14	11

TABLA V

PROCESO DE SECADO 3

Velocidad del aire = 0.14 m/s

Temperatura del aire = 75 °C

Espesor de la cam = 11 cm

t	P	A.R	N	Hbh	To	Tiba	Tibh	HR ₁	HR ₀	N ₁
[min]	[kg]	[kg]	[kg/m-min]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]
0	2.505	0.000	0.000	50.48	30	25	22	75	100	100
8	2.403	0.075	0.250	48.87	30	25	22	75	100	100
14	2.370	0.135	0.260	47.57	32	25	22	75	100	100
28	2.225	0.280	0.270	44.00	33	25	22	75	100	100
49	1.985	0.520	0.287	37.40	33	26	22	72	100	100
68	1.785	0.720	0.266	30.39	48	26	22	72	35	32
78	1.725	0.780	0.270	27.90	50	26	22	72	30	27
88	1.660	0.825	0.250	25.97	54	27	23	71	22	19
96	1.635	0.870	0.245	23.93	60	27	23	71	15	11
116	1.605	0.906	0.210	22.50	61	28	23	70	14	10
135	1.575	0.930	0.166	21.00	62	26	23	70	13	9
155	1.550	0.955	0.166	19.74	65	28	23	70	10	6
175	1.525	0.980	0.150	18.42	65	28	23	70	10	6
195	1.500	1.005	0.139	17.06	66	26	23	70	9	5
215	1.480	1.025	0.129	15.93	66	28	23	70	9	5
239	1.460	1.040	0.118	14.78	67	28	24	73	8	4
270	1.430	1.075	0.108	12.98	67	28	24	73	8	4
311	1.400	1.105	0.096	11.11	67	26	24	73	8	4
345	1.375	1.130	0.086	9.50	67	28	24	73	8	4
405	1.345	1.160	0.077	7.50	67	27	23	74	8	4
450	1.315	1.190	0.072	5.26	66	25	24	75	7	3
495	1.300	1.205	0.066	4.24	68	24	24	76	7	3
550	1.280	1.225	0.060	2.74	69	22	25	77	6	2

63

TABLA VI

PRUEBA DE SECADO 4

Velocidad del aire = 0.14 m/s

Temperatura del aire = 75 °C

Espesor de la cama = 3.5 cm

t	P	A.B	N	H _{bh}	To	T _{bm}	T _{bh}	HR _i	HR _o	N _i
[min]	[kg]	[kg]	[kg/m-min]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]
0	0.995	0.000	0.000	50.50	33	27	23	72	100	100
8	0.910	0.085	0.287	45.80	37	27	23	72	78	77
14	0.845	0.150	0.289	41.70	42	28	24	73	55	53
23	0.780	0.215	0.253	38.80	50	28	24	73	30	27
34	0.730	0.265	0.211	32.50	55	28	24	73	21	18
41	0.715	0.280	0.185	31.10	57	28	24	73	18	15
49	0.700	0.295	0.163	29.80	60	28	24	73	15	11
57	0.890	0.305	0.145	28.60	62	27	23	72	13	9
78	0.865	0.330	0.117	25.90	84	27	23	72	11	7
101	0.845	0.350	0.094	23.80	84	27	23	72	11	7
135	0.820	0.375	0.075	20.50	85	29	24	88	10	8
159	0.600	0.395	0.087	17.80	65	29	24	68	8	6
189	0.585	0.410	0.059	15.70	68	29	24	68	8	4
261	0.505	0.490	0.051	2.40	89	29	24	68	7	3



BIBLI

TABLA VII

PRUEBA DE SECADO 5

Velocidad del aire = 0.03 m/s

Temperatura del aire = 75 °C

Espesor de la cama = 20 cm

t	P	A.E	N	H _{bh}	T _o	T _{1m}	T _{1h}	HR ₁	HR _o	N ₁
[min]	[kg]	[kg]	[kg/m-min]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]
0	4.550	0.000	0.000	49.9	0	0	0	0	0	0
2	4.427	0.123	0.023	48.5	46	27	23	72	95	95
4	4.203	0.347	0.022	45.6	54	27	23	72	79	78
6	4.072	0.476	0.016	44.0	60	27	23	72	100	100
8	3.911	0.636	0.013	41.6	62	29	24	66	90	90
10	3.720	0.628	0.021	36.6	62	29	24	66	63	82
12	3.590	0.959	0.026	36.5	62	29	24	66	61	60
14	3.450	1.095	0.026	34.0	62	27	23	72	77	76
16	3.260	1.293	0.032	30.0	63	27	23	72	66	65
16	3.060	1.469	0.031	25.5	60	27	23	72	69	66
20	2.960	1.569	0.033	23.0	61	26	23	75	59	57
22	2.760	1.769	0.027	16.0	64	26	23	75	65	64
24	2.710	1.640	0.019	15.5	66	23	25	77	52	50
26	2.640	1.914	0.013	13.5	69	24	25	77	54	52
26	2.590	1.959	0.012	12.0	69	25	25	77	54	52
30	2.530	2.017	0.009	10.0	70	26	23	75	52	50
32	2.512	2.036	0.007	9.3	71	27	23	72	49	47
36.5	2.462	2.066	0.006	7.4	72	27	23	72	33	30

Clave	Prueba
○	1
△	2

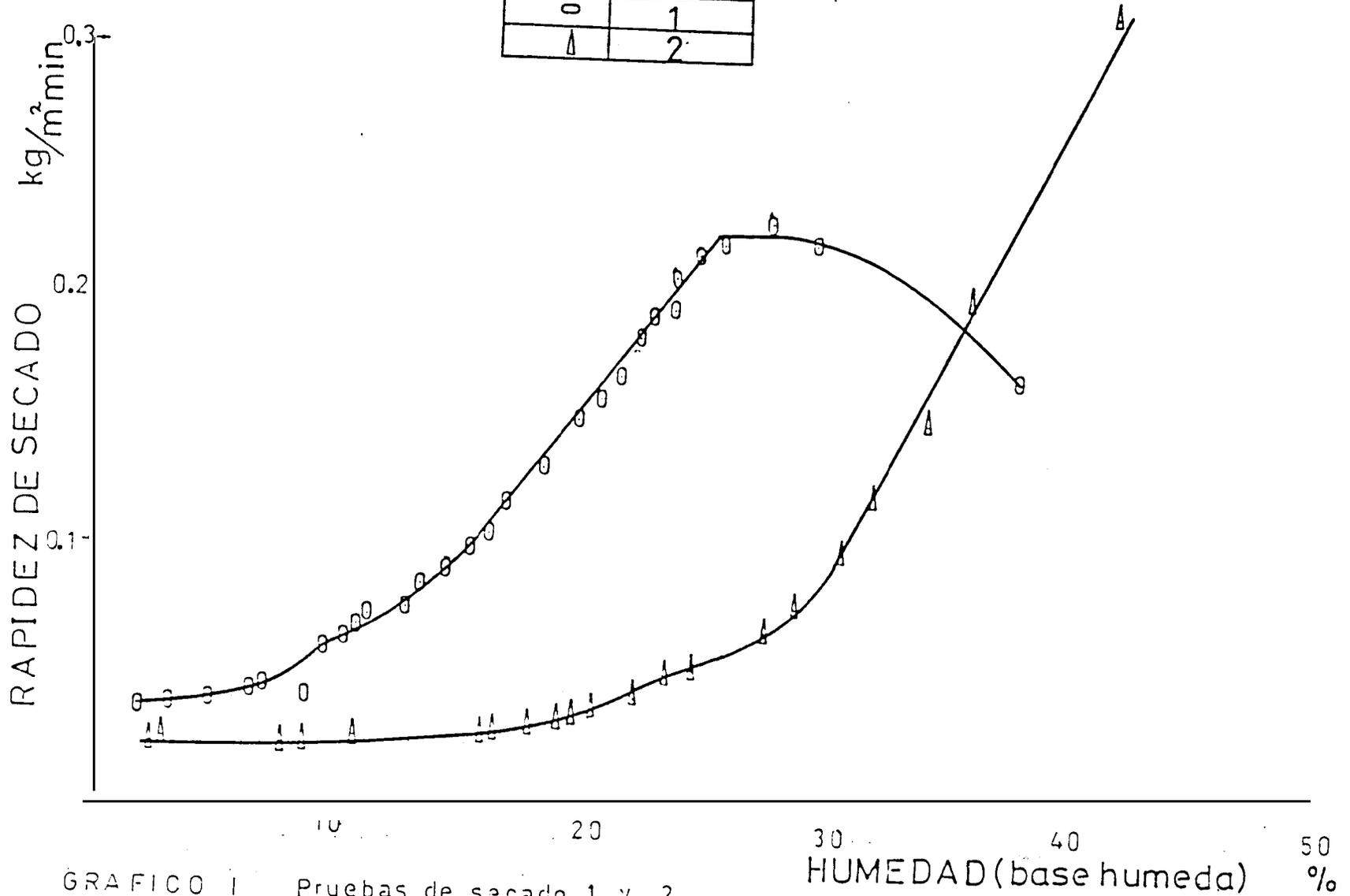


GRAFICO 1 Pruebas de secado 1 y 2

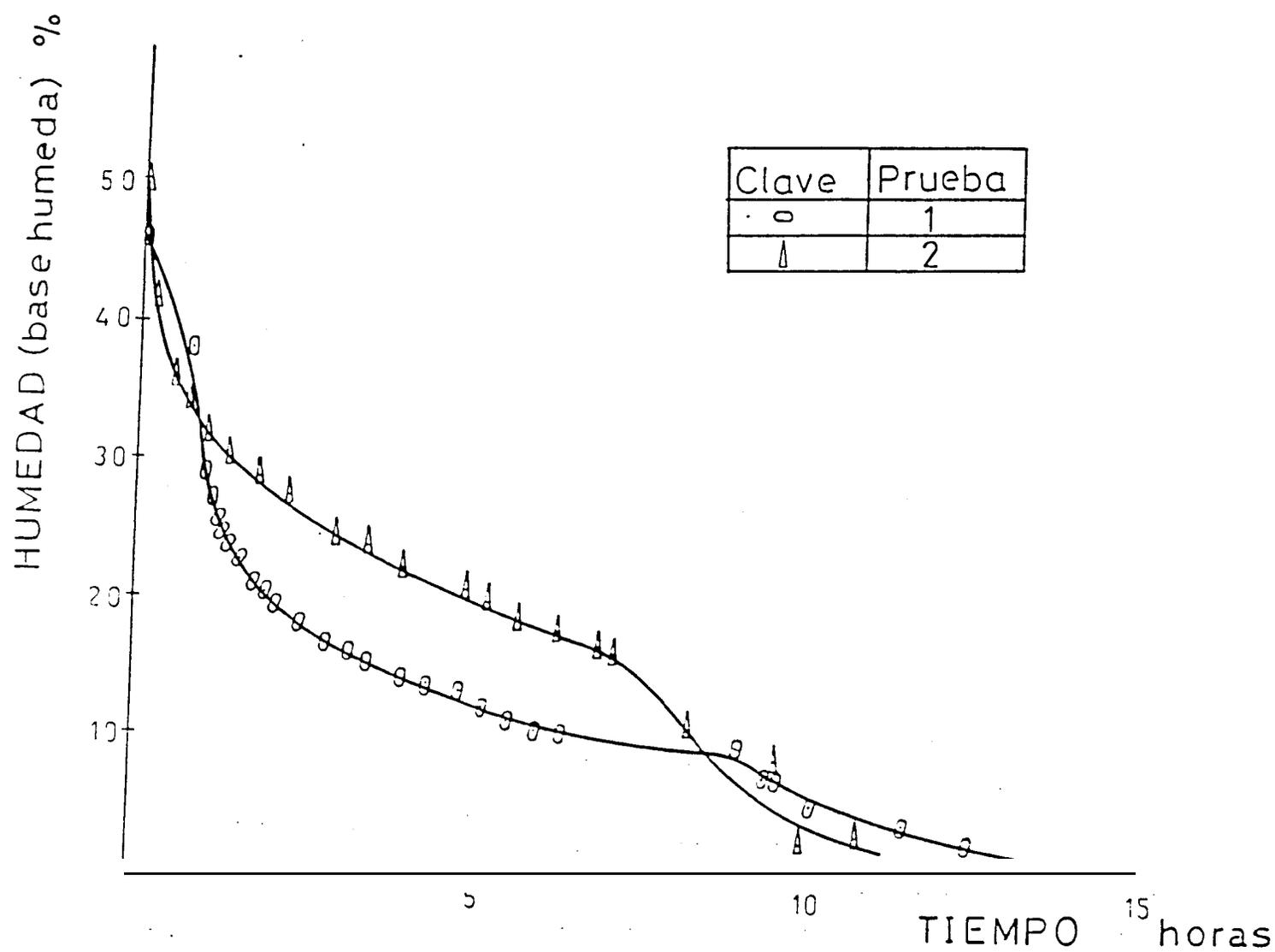


GRAFICO II Para las pruebas 1 y 2

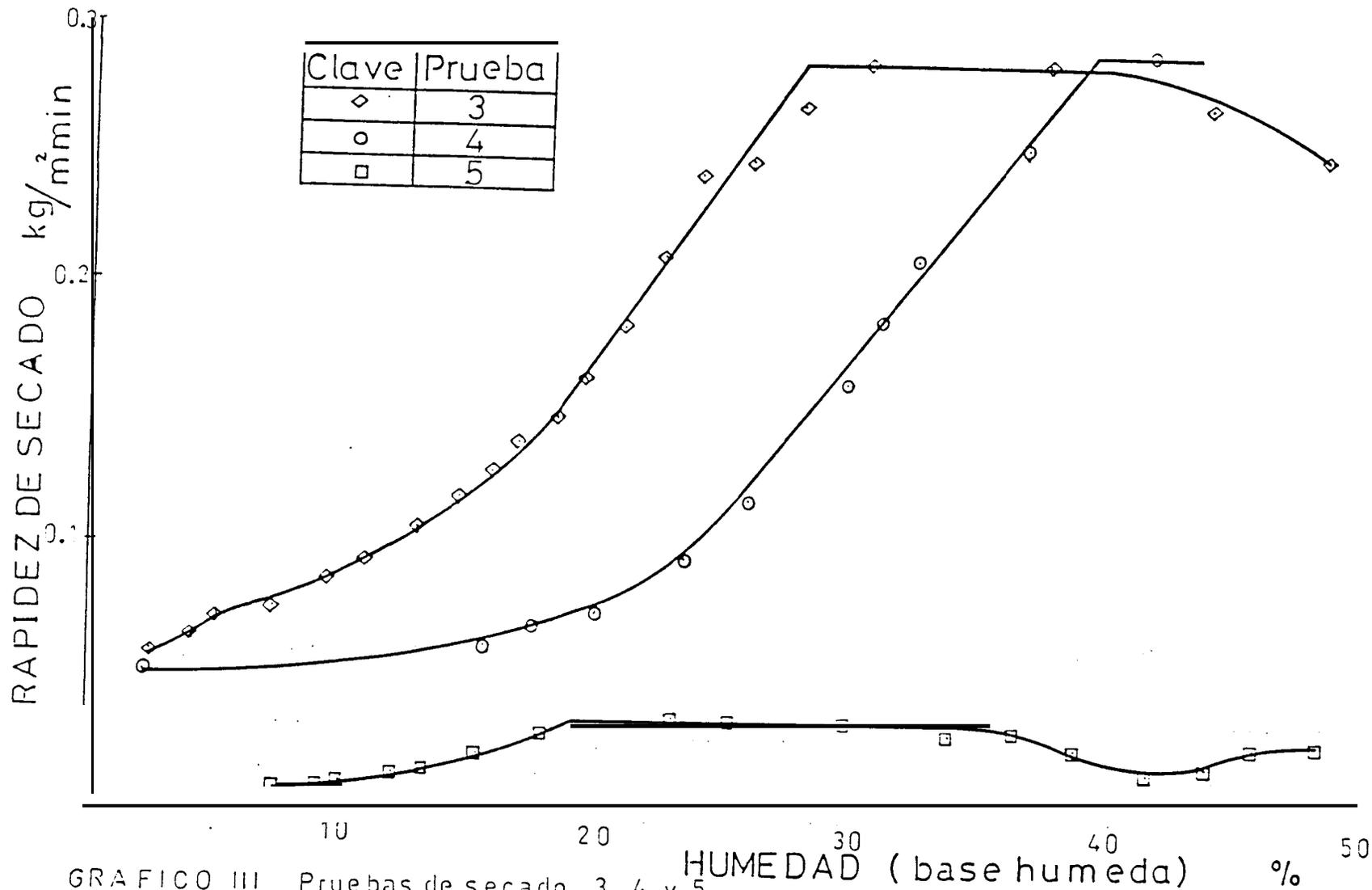


GRAFICO III Pruebas de secado 3, 4 y 5

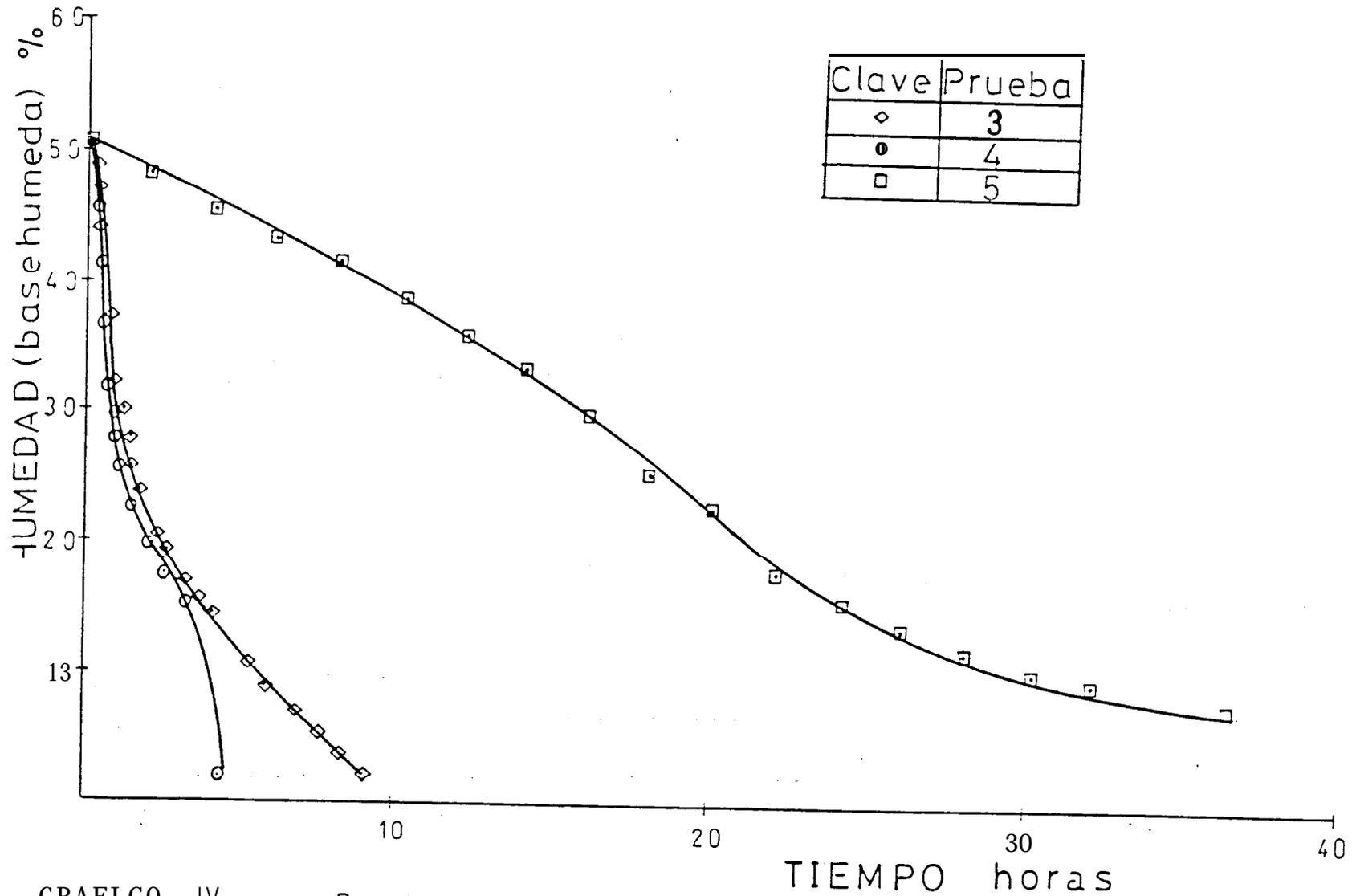


GRAFICO IV

Pruebas de secado 3, 4 y 5

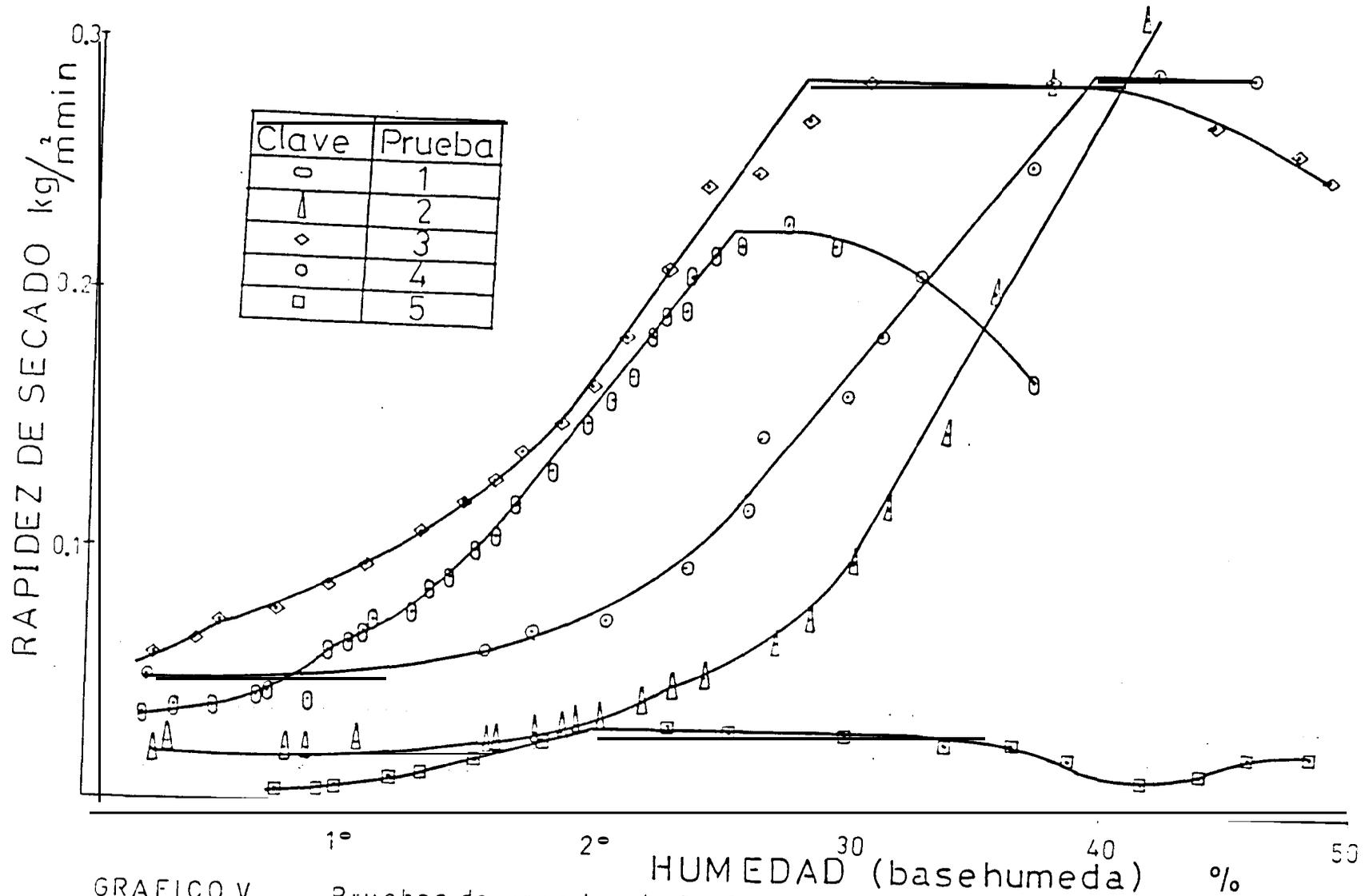


GRAFICO V Pruebas de secado 1, 2, 3, 4 y 5

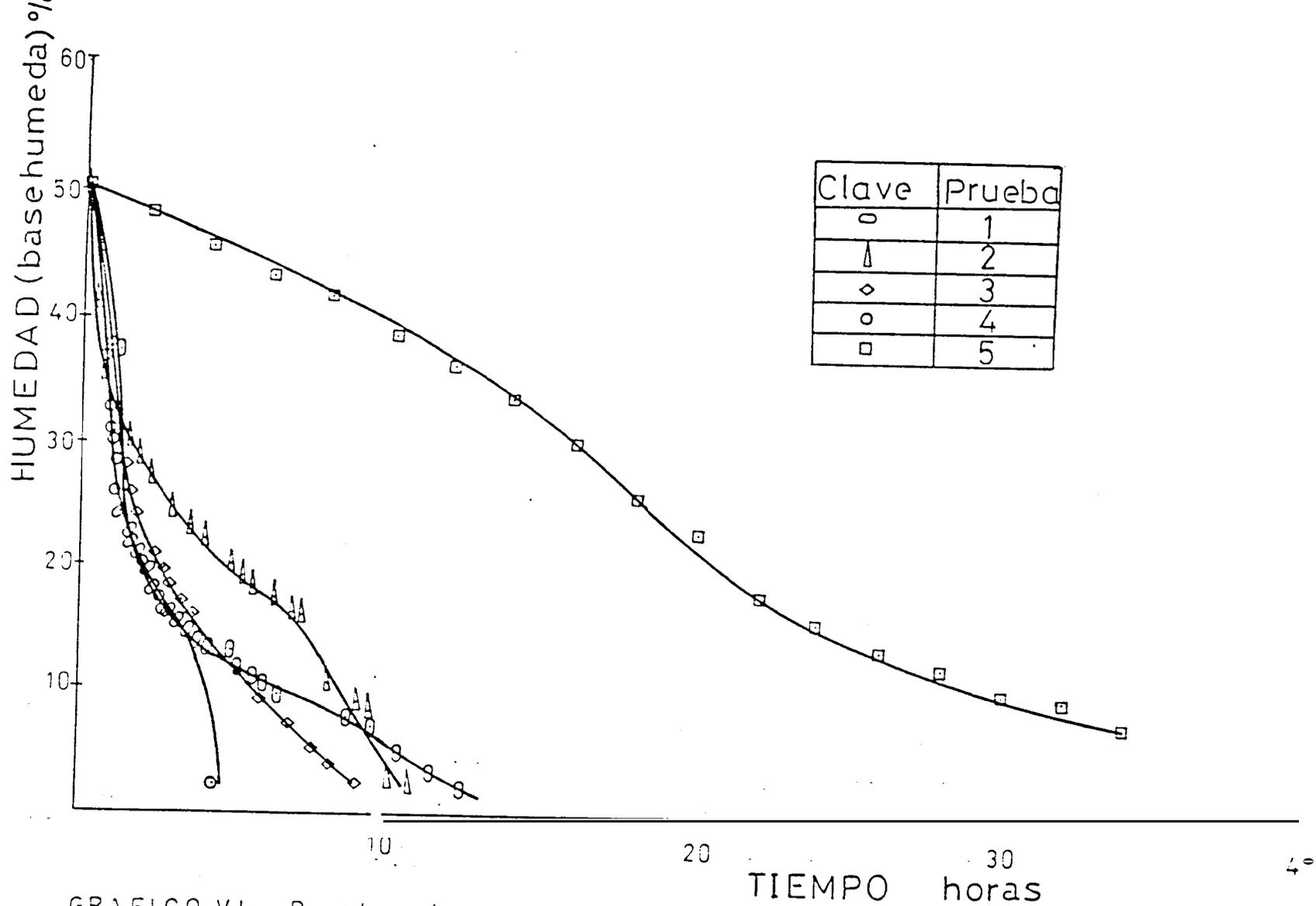


GRAFICO VI Pruebas de secado 1, 2, 3, 4 y 5

Clave	Prueba
○	1
△	2
◇	3
○	4
□	5

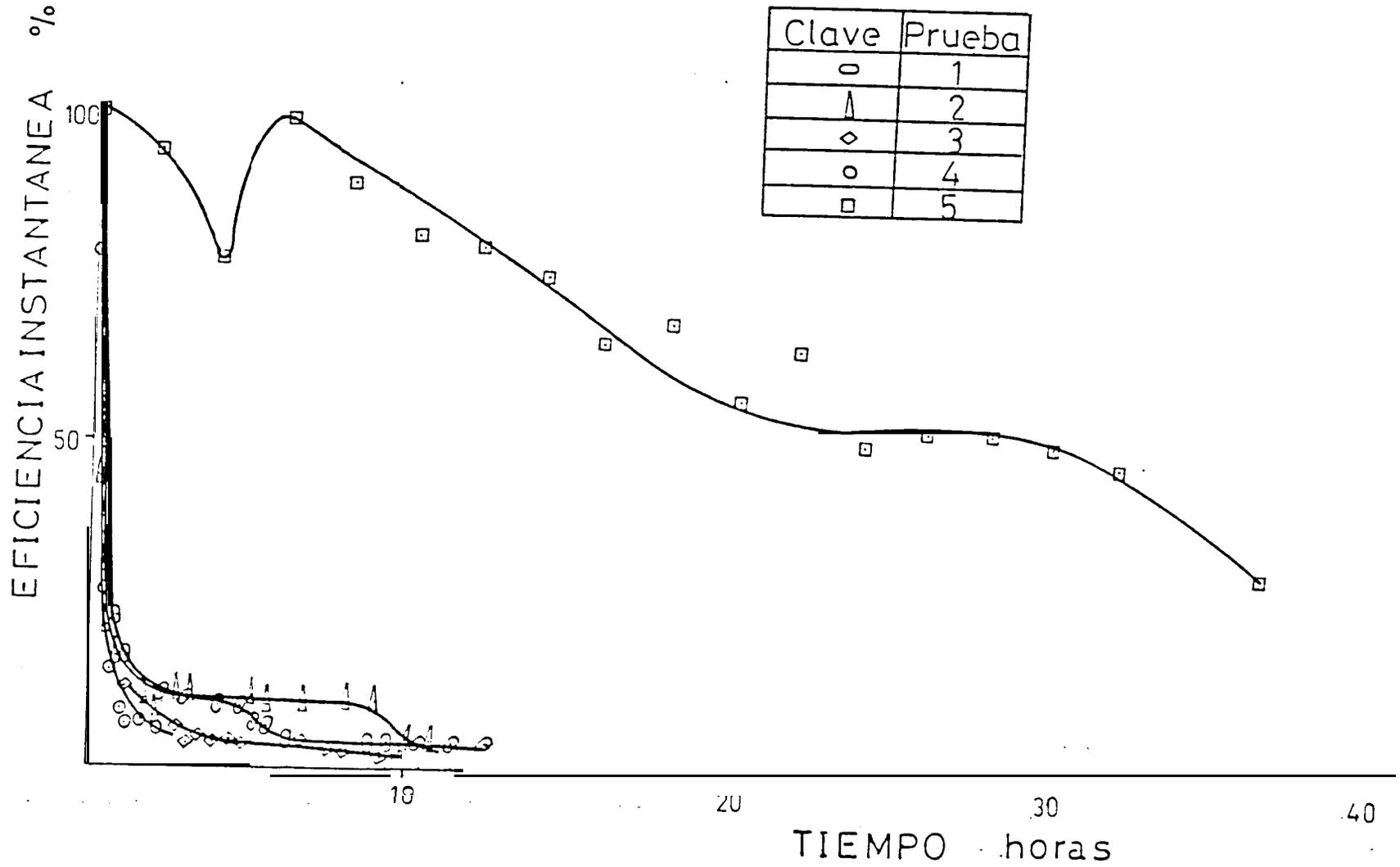


GRAFICO VII Pruebas de secado 1, 2, 3, 4 y 5

CAPITULO V

ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Comportamiento de las curvas de secado.

El gráfico V muestra la variación de la rapidez de secado con respecto a la humedad (base húmeda) para todas las pruebas. En todos los casos los valores de las humedades críticas han variado, dependiendo de cuales hayan sido las características de secado empleadas. Esta humedad crítica tiende a aumentar cuando aumenta el espesor de la cama compacta formada por los granos. Del mismo gráfico V es notorio observar tres fases o periodos que son:

- 1º) El periodo de ajuste inicial, en este caso el grano recién comienza a calentarse y ocurre una evaporación superficial del grano.
- 2º) El periodo constante de secado, en este periodo ocurre el secado del frente de la almendra.
- 3º) Periodo decreciente, ocurre aquí el secado del cotiledón del grano (desde el valor de la humedad crítica hasta el 0%).

Este tipo de comportamiento se debe a que cuando

recien el cacao está fermentado, contiene alto porcentaje de humedad superficial y por ende la rapidez de secado se mantiene alta y constante. Una vez que los frentes de las almendras están secos, resulta en una disminución del secado.

La Tabla VIII muestra todos los 10% resultados importantes obtenidos de cada tin.3 de las cinco pruebas, se observa que la prueba que mayor tiempo tomó es la quinta (36.5 horas) y la de menor tiempo es la cuarta (4.35 horas). Comparando pruebas de igual flujo y temperatura de aire pero diferentes espesores, como en las pruebas 1 con 2 y 3 con 4 se tiene el incremento del tiempo de secado con el aumento del espesor del lecho. En la décima columna de la Tabla VIII se dan los valores de la razón de tiempo (%), que se obtiene al dividir el tiempo que se demora el grano hasta alcanzar la humedad crítica, con respecto al tiempo total de secado; esta razón tiene como propósito ayudar a elegir el espesor más conveniente para cierta velocidad del air-e. Siempre resulta más satisfactorio tener un periodo de secado constante más largo por cuanto con esto se logra obtener una mayor velocidad de secado y por lo mismo se disminuye el tiempo. En las pruebas 3 y 4 se observa como la razón de tiempo resulta mayor para la tercera (11 cm de espesor y 13% de razón de tiempo)

TABLA VIII

RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE SECADO

Espesor	Velocidad del aire	Temp. del aire	No	Tiempo total de secado		SHbh	Tiempo hasta que sea la Hor	Razón de tiempo
				[cm]	[m/s]			
8.3	0.26	60	0.230	745	12.42	24-40	1.4	11
4.6	0.26	60		642	10.70			
11.0	0.14	75	0.287	550	9.17	27-38	1.2	13
3.5	0.14	75	0.290	261	4.35	38-45	0.4	9
20.0	0.03	75	0.260	2190	36.5	20-32	20.0	55

con respecto a la cuarta (3.5 cm de espesor y 9% de razón de tiempo) para 0.144 m/s y 75 °C de velocidad y temperatura del aire respectivamente. Comparando la primera con la segunda prueba, esta razón de tiempo es más satisfactoria para la primera (8.3 cm de espesor y 11 % de razón de tiempo), en tanto que en la segunda (4.6 cm de espesor) ni siquiera ha habido periodo de secado constante. Las condiciones para estas dos pruebas fueron 0.26 m/s y 60 °C de velocidad y temperatura respectivamente.

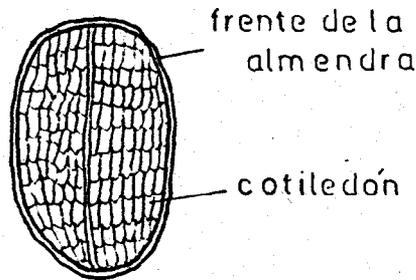


Fig. 5.1 Partes del grano de cacao

Comparando nuevamente la cuarta con la tercera prueba, el valor de la rapidez de secado constante se mantiene igual ($0.290 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$), es decir no ha influido el espesor del lecho.

Comparando las pruebas tercera, cuarta y quinta del gráfico III, se tiene que al aumentar el espesor del lecho o al incrementarse la intensidad de secado, el

valor de la humedad crítica tiende a tener valores menores.

5.2 Variación de la eficiencia instantánea de secado.

La gráfica VII muestra como varia la eficiencia instantánea de secado con respecto al tiempo, y es por demás notorio observar que para las pruebas 1, 2, 3 y 4 los valores de eficiencia obtenidos son muy bajos en relación a los obtenidos en la 5. En todas las pruebas siempre comienza siendo muy elevado, pero va decreciendo conforme pasa el tiempo, esto se hace más notorio en las cuatro primeras pruebas debido a que se usaron relativamente altos valores de flujo con relación a la prueba 5, en donde la eficiencia va decayendo pausadamente. En las cuatro pruebas iniciales, un promedio de eficiencia fue de alrededor del 8% mientras que en la quinta fue alrededor del 60%. Este comportamiento se debe sobre todo, a que el flujo de aire utilizado en esta última prueba permitió al aire estar más tiempo dentro del lecho de granos y por lo mismo que la transferencia de masa del grano al aire sea mayor.

CAPITULO VI

CALCULOS PARA EL DISEÑO TERMICO DEL SECADOR

La figura 6.1 presenta en forma muy esquemática el secador de tipo plataforma.

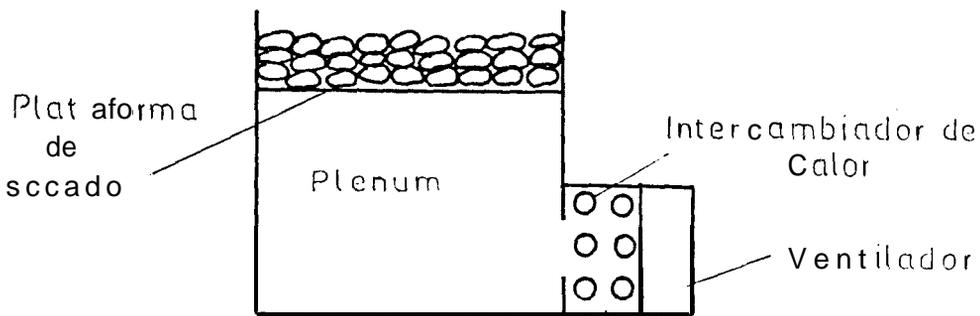


Fig. 6.1 Esquema del secador del tipo plataforma

Del análisis de resultados hecho en el Capítulo V resultó que las condiciones más idóneas de secado se obtuvieron en la prueba cinco, por lo que el diseño del secador estará restringido a las condiciones imperantes en esa prueba, e s decir:

Espesor de la cama de secado = 20 cm.

Velocidad del aire = 0.03 m/s.

Temperatura de aire = 75 °C .

Asumiendo que la carga a secar es de 4545.45 kg de cacao húmedo, se procede entonces a calcular el área de la plataforma de secado, la carga térmica a vencer y la velocidad del ventilador.

6.1 Cálculo de la fracción vacio.

Un valor importante a calcular y que depende más que todo de la configuración geométrica del grano, es la fracción E, conceptualizado en la ecuación 2.6 como:

$$E = \frac{\text{Volumen de vacíos en la cama}}{\text{Volumen total de la cama (vacíos+sólidos)}} \quad (2.6)$$

$$E =: \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_v + V_m}$$

$$V_m = V_t (1 - E) \quad (6.1)$$

El E se lo calculó en base al espacio de vacíos que se lo detectó, al llenar un recipiente de un volumen dada lleno de granos de cacao, con agua; la cantidad de agua que se pudo meter entre los granos y el recipiente resulta ser el espacio de vacíos.

$$E = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen del recipiente}} = \frac{220 \text{ cm}^3}{525 \text{ cm}^3}$$

$$E = 0.42$$

Otro valor necesario es el de la densidad del cacao cuando está húmedo.

Pesando una porción de cacao húmedo graneado, y encerrándolo en un recipiente con un volumen dada entonces la densidad será:

$$\text{Densidad cacao húmedo} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen del sólido}}$$

$$d_{ch} = \frac{M}{V_m} = \frac{M}{V_t (1 - E)}$$

$$d_{ch} = \frac{225.4 \text{ g}}{379.96 (1 - 0.42) \text{ cm}^3}$$

$$d_{ch} = 1.022 \text{ g/cm}^3$$

6.2 Cálculo del área de la plataforma de secado.

Al secar 4545.45 kg de cacao, se debe de calcular primero cual va a ser el volumen ocupado por esta masa. Tomando en cuenta que el área del secador va a tener la forma de un rectángulo, con un espesor igual a 20 cm, se procede:

$$\text{Volumen de sólido} = \frac{\text{Masa a secar}}{\text{Densidad cacao húmedo}}$$

$$V_m = \frac{m_m}{d_{ch}} = \frac{4545.45 \text{ kg}}{1.022 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_m = 4.45 \text{ m}^3$$

El volumen de la cama compacta, V_c es:

$$V_c = \frac{V_m}{1 - E} = \frac{4.45 \text{ m}^3}{0.58}$$

$$V_c = 7.67 \text{ m}^3$$

El área de la plataforma de secado, A_p , es:

$$A_p = \frac{V_c}{\text{Espesor de 1. a cama}}$$

$$A_p = \frac{7.67 \text{ m}^3}{20 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$A_p = 38.35 \text{ m}^2$$

6.3 Cálculo de la capacidad necesaria del ventilador.

Para este caso hay que tomar en cuenta las dos caídas de presión que existirán en todo el sistema, las cuales ocurren en el intercambiador de calor y en la camada de granos, despreciándose lo que ocurre en el ducto por ser la velocidad muy pequeña y el diámetro lo suficientemente grande.

6.3.1 Cálculo de la caída de presión estática en la cama compacta.

Para este caso, es necesario saber cual es el área

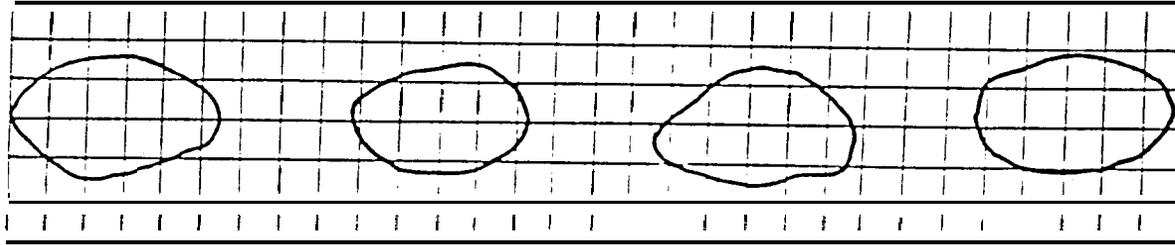
interf acial y el volumen **del.** grano. Se recurrió a un artificio de comparar al grano con una elipse . En la figura 6.2 se muestra una elipse señalándose sus partes y el modo de calcular el área superficial y su perímetro. Luego se dibujaron cuatro granos escogidos al azar en papel milimetrado; de tal manera que se puedan obtener promedios de D, e y d. La figura 6.3 muestra los cuatro granos dibujados. El método de obtener el **Area** interfacial S_p consistió en: de la figura 6.3 teniéndose como referencia el hecho de que un cuadrado de área $s'=0.25$ cm, entonces el producto del número de cuadros promedio que ocupa un grano y el área s' , se obtiene el área de la parte A del grano. Por otro lado, el producto entre el perímetro y el espesor promedio será igual al **Area** superficial de la parte B **del.** grano. El área inter-facial será igual entonces a::

$$S_p = [\text{número de cuadros promedio} \times s' \times \text{número de caras.}] + [\text{perímetro} \times e]$$

$$S_p = 12.5 \times 0.25 \times 2 + \pi \frac{2.79 + 1.525}{2} \times 0.825$$

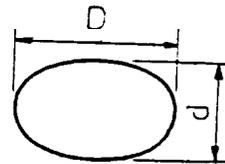
$$S_p = 6.25 + 5.59$$

$$S_p = 11.84 \text{ cm}^2$$



PROMEDIO DE CUADRITOS OCUPADOS POR EL GRANO 12.5 cm
 PROMEDIO DE ESPESOR DE GRANO 0.8 cm
 PROMEDIO LADO d 1.5 cm
 PROMEDIO LADO D 2.8 cm

FIG. 6.3 Cálculo para hallar el área superficial y el volumen del grano de cacao



$$\text{Área superficial} = \frac{\pi}{4} D d$$

FIG. 6.2 Dibujo de una elipse cuya forma es similar a un grano de cacao

El volumen de la partícula es igual a:

$$V_p = \text{número de cuadros promedio} \times s' \times e$$

$$V_p = 12.5 \times 0.25 \times 0.825$$

$$V_p = 2.578 \text{ cm}^3$$

Continuando con el cálculo de la caída de presión de la ecuación (2.2) la superficie específica fue definida como:

$$a_v = S_p / V_p \quad (2.2)$$

$$a_v = 11.84 / 2.578$$

$$a_v = 4.53 \text{ cm}^{-1}$$

De la ecuación (2.3) se definió el valor de a_v como:

$$a = a_v (1 - E) \quad (2.3)$$

$$a = 4.53 (1 - 0.42)$$

$$a = 2.66 \text{ cm}^{-1}$$

El radio hidráulico es definido en la ecuación (2.5) como:

$$r_h = E / a \quad (2.5)$$

$$r_h = 0.42 / 2.66 = 0.16 \text{ cm} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

De la ecuación (2.6) el número de Reynolds es:

$$Re = \frac{4 r_h v'}{E} \quad (2.6)$$

$$Re = \frac{4 \times 1.6 \times 10^{-3}}{0.42 \times 1.79 \times 10^{-5}} v'$$

$$Re = 840 v'$$

La Tabla IX indica como varia el valor. de Re al variar el flujo de aire.

TABLA I?:

VARIACION DE Re AL CAMBIAR EL FLUJO DE AIRE

v' [m/s]	Re
0.030	25.2
0.260	218
0.144	118

Por ser los tres casos de flujo transitorio, se utiliza la ecuación (2.6): el diámetro de la partícula se obtiene de comparar el área interfacial S_P con el área de una esfera y de ahí despejar el diámetro de la partícula d_p .

$$S_P = D_P^2 \quad ; \quad D_P = \sqrt{11.84 / \pi}$$

$$D_P = 1.99 \text{ cm}$$

$$\delta P = \frac{32 \mu d (v'/E) \delta L}{(4 r_H)^2} + \frac{1.75 d (v')^2 \delta L (1-E)}{D_p E^3} \quad (2.7)$$

$$\delta P = \frac{32 \times 2 \times 10^{-5} (v'/0.42) \delta L}{(4 \times 1.6 \times 10^{-3})^2} + \frac{1.75 \times 1.089 (v')^2 \delta L (1-0.42)}{1.99 \times 10^{-2} (0.42)^3}$$

$$\delta P = v' \delta L (37.2 + 749.7 v')$$

En la Tabla X se registran las caídas de presión en función del espesor δL de la cama compacta y de la velocidad del aire al ingresar a la cama.

El valor que interesa de esa tabla es el de la prueba número cinco, por ser él con el cual se está haciendo el diseño.

Prosiguiendo con el cálculo de la capacidad del ventilador, el caudal necesario va a hacer entonces de:

Caudal = Q = velocidad del aire \times Area de plataforma

$$Q = 0.03 \text{ m/s} \times 38 \text{ m}^2$$

$$Q = 1.14 \text{ m}^3/\text{s} \approx 2400 \text{ CFM}$$

El secador constará de un "Plenum" que no es otra cosa que un compartimiento cerrado que se encuentra debajo del lecho de granos. El Plenum es diseñado de tal manera que el aire impulsado por el ventilador sea distribuido uniformemente en toda la camada del grano. En un primer instante, este Plenum se llenará

TABLA X

CUADRO DE US CAIDAS DE PRESION, EN FUNCION DEL ESPESOR DE
LA CAMA Y LA VELOCIDAD DELAIRE

Prueba	v' [m/s]	δL [m]	δP	
			[N/m]	pulg H ₂ O
1	0.26	8.3×10^{-2}	5.00	0.019
2	0.26	4.6×10^{-2}	2.30	9.18×10^{-3}
3	0.14	11.0×10^{-2}	2.30	1.69×10^{-3}
4	0.14	3.5×10^{-2}	0.70	5.15×10^{-3}
5	0.03	20.0×10^{-2}	0.36	2.65×10^{-3}

de aire para luego de estabilizadas las presiones dentro de él, comenzar a salir por los espacios vacíos que hay entre los granos. La altura del Plenum debe ser relativamente pequeña, de tal manera que se consiga una acción inmediata de desalojo del aire y además un ahorro de materiales en la construcción del secador, la altura del Plenum será de 50 cm.

Las caídas de presión más relevantes y de tomarse en cuenta, son en el intercambiador de calor (7) que es de 0.5 pulg de agua y en la cama de granos, cuyos resultados todos se encuentran en la Tabla IX, y para la prueba cinco es de 2.65×10^{-4} pulg de agua; entonces la caída de presión total en el sistema es de alrededor 0.50 pulg de agua.

Para el propósito de este diseño conviene elegir un ventilador axial, por facilidad de montaje y por servir a los requerimientos que se necesitan para este caso. En el mercado existe el ventilador axial marca PENN CUBEX AIRS MOVERS modelo QX 16 cuyas características técnicas son:

Diámetro = 0.42 m

Caudal = 1.19 m³/seg

SP = 1.59 cm de agua

1155 RPM

0.66 BHP

6.4 Cálculo de la carga térmica.

Haciendo un volumen de control. en la figura 6.4 se puede entonces hacer un balance de energías:

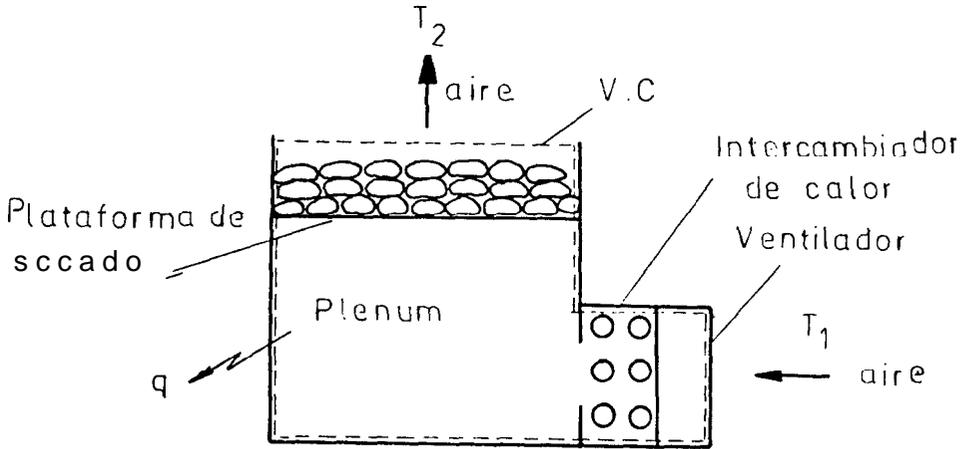


Fig. 6.4 Volumen de control del secador.

$$E_1 - E_0 + E_g = E_{at}$$

$$m c_p T_1 - m c_p T_2 - q + E_g = N L_v A_p$$

$$E_g = m c_p (T_2 - T_1) + h_o A (T_w - T_1) + N L_v A_p \quad (6.2)$$

Donde:

E_1 = Energía que entra al volumen de control

E_0 = Energía que sale del volumen de control

E_{at} = Energía almacenada en el volumen de control

E_g = Energía generada en el volumen de control

h_o = Coeficiente convectivo de transferencia de calor, [Watt/m²·°C]

A = Superficie de transferencia de calor que existe entre el secador y el ambiente, (m^2)

A_p = Area de la plataforma de secado, (m^2)

q = Calor que sale a través de las paredes del secador, $(Watt)$

m = Flujo másico del aire, (kg/s)

c_p = Calor específico del aire a la temperatura promedio entre la entrada y la salida, $(J/Kg-^{\circ}K)$

T_1 = Temperatura del aire a la entrada del volumen de control, $(^{\circ}C)$

T_2 = Temperatura del aire a la salida del volumen de control, $(^{\circ}C)$

T_w = Temperatura de la pared del secador, $(^{\circ}C)$

N = Rapidez de secado, $(kg \text{ de agua}/s-m^2)$

L_v = calor latente de evaporación, (KJ/kg)

De la Tabla VII en la que se encuentran dados los valores de la prueba cinco, se toman los valores que se reemplazan en la ecuación (6.2).

En la figura 6.5 se muestra cómo se tomaron los valores promedios de N para cada uno de los periodos de secado.

De la figura 6.6 par.3 el periodo constante y para el periodo decreciente, la rapidez de secado es respectivamente:

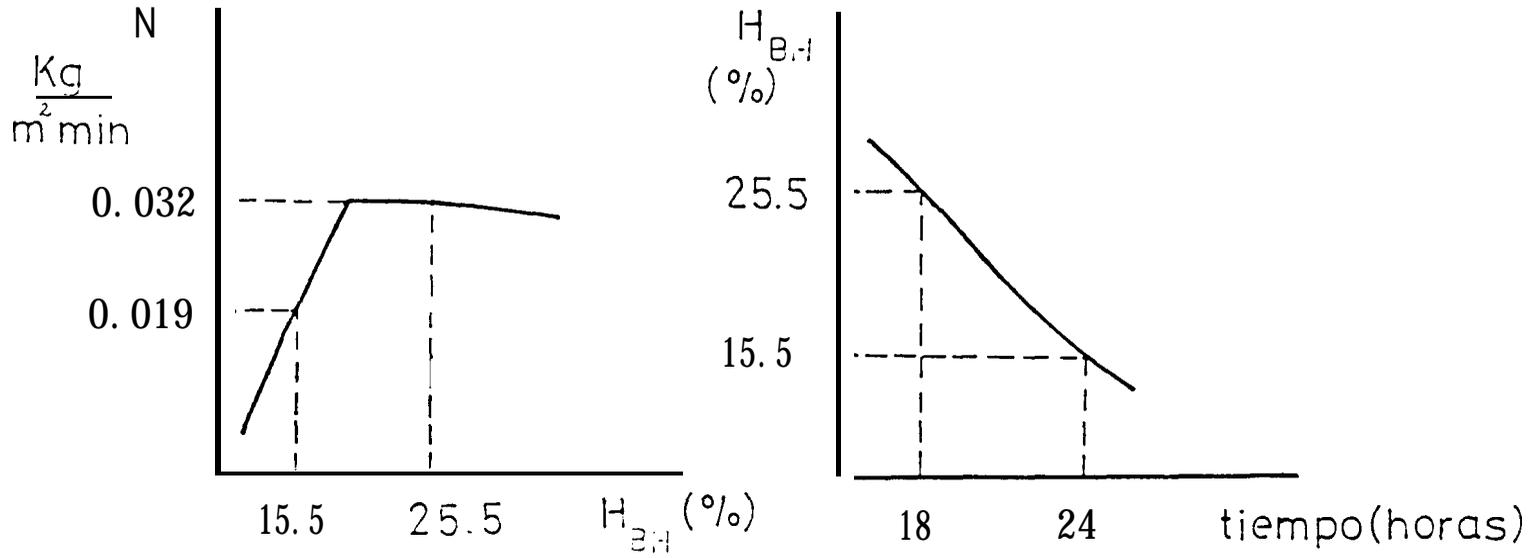


FIG 6.5 Grafico de N vs. $H_{B,H}$ y $H_{B,H}$ vs. tiempo en donde SC toman los valores promodios

$$N_e = 0.026 \text{ kg/m}^2\text{-min}$$

$$N_a = 0.014 \text{ kg/m}^2\text{-min}$$

El área de transferencia de calor entre el secador y el ambiente es de 35 m^2 . El calor latente, calor sensible y densidad se los toma a la temperatura promedio de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ y son respectivamente: 2409.7 KJ/kg , 1005 J/kg y 1.10 kg/m^3 . El valor de h_o set-d igual al obtenido en el Capítulo III sección 3.3, es decir, de $5.5 \text{ Watt/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$. Después de 18 y 24 horas la temperatura del aire a la entrada fue de 27 y $23 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente y la temperatura a la salida fue de 61 y $49 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. La temperatura promedio de las paredes del secador se la toma igual como para el caso del secador experimental, es decir de $53 \text{ }^\circ\text{C}$. Reemplazando todos estos valores en la ecuación (6.2) se tiene:

- Para el periodo constante,

$$E_{qc} = 1.26 \text{ m}^3/\text{s} \times 1.10 \text{ kg/m}^3 \times 1005 \text{ J/kg-}^\circ\text{K} \times (61 - 27) \text{ }^\circ\text{K} + 5.5 \text{ Watt/m}^2\text{-}^\circ\text{C} \times 35 \text{ m}^2 \times (53 - 27) \text{ }^\circ\text{C} + 0.031 \text{ kg/m}^2\text{-(1 min/60 s)} \times 2409.7 \text{ J/kg} \times 38.1 \text{ m}^2$$

$$E_{qc} = 47359.62 + 3467.11 + 47434.94$$

$$E_{qc} = 98261.66 \text{ Watt}$$

- Para el periodo decreciente,

92

$$E_{gd} = 1.26 \text{ m}^3/\text{s} \times 1.10 \text{ kg/m}^3 \times 1005 \text{ J/kg-}^\circ\text{K} (69-23) \\
^\circ\text{K} + 5.5 \text{ Watt/m}^2\text{-}^\circ\text{C} \times 35 \text{ m}^2 \times (53-27) ^\circ\text{K} + \\
0.019 \text{ kg/m}^2\text{-(1 min/60 s)} \times 2409.7 \text{ J/kg} \times \\
38.11 \text{ m}^2$$

$$E_{gd} = 64074.78 + 4000.00 + 29080.00 \text{ Ah}$$

$$E_{gd} = 97155.44 \text{ watt}$$

Tomando el mayor de los dos valores, entonces queda que la cantidad de energía térmica necesaria requerida es de 98261 Watt \approx 98.3 KWatt.

En definitiva, para secar 10000 libras d e cacao con una humedad del 50% (b a s e húmeda) p a r - a un periodo de secado de unas 36 horas con un espesor de cama de 20 cm, se necesitará un secador del tipo plataforma con las siguientes características:

AREA DE LA PLATAFORMA DE SECADO	= <u>38 m²</u>
TEMPERATURA DEL AIRE	= 75 °C
CAUDAL DEL AIRE	= 1.14 m ³ /seg
ENERGIA TERMICA NECESARIA	= 98.3 KWatt
ALTURA DEL PLENUM	= 50 cm
PRESION ESTATICA A VENCER	= 1.27 cm de agua

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- A **continuación** se **presenta** la **Tabla XI** en donde se registra el tiempo que le **tomó** al grano de cacao secarse desde una **humedad inicial** en base **húmeda** de alrededor 50% hasta el valor **señalado** en la misma, **para** diferentes condiciones de secado.

TABLA XI

RESULTADOS CONCLUYENTES DE LAS PRUEBAS DE SECADO

Prueba	Humedad inicial	Humedad final	Espesor del lecho	Velocidad del aire	Temperatura del aire a la entrada del lecho	Tiempo
	[%]	[%]	[cm]	[m/s]	[°C]	[hr]
1	45.80	2.20	8.3	0.260	60	12.42
2	50.00	2.60	4.6	0.260	60	10.70
3	50.48	2.70	11.0	0.144	75	9.17
4	50.48	2.40	3.5	0.144	75	4.35
5	49.90	7.40	20.0	0.030	75	36.50

- **Para** una **velocidad y temperatura del aire** de 0.26 m/s y 60 °C es **más conveniente utilizar** un lecho **cuyo** espesor de **cama** tenga 8.3 cm a otro que tenga **menos** espesor.

Para una velocidad y temperatura del aire de 0.03 m/s y 75 °C respectivamente, es satisfactorio utilizar espesores de cama de por lo menos 20 cm.

Para una velocidad y temperatura del aire de 0.144 m/s y 75 °C respectivamente, es más conveniente utilizar espesores de cama que tengan 11 cm de espesor a otro que tenga menos espesor.

- En las pruebas que se hicieron para los diferentes flujos y temperaturas de aire, no se llega a determinar cual es el espesor óptimo de secado pero nos dicen muy claramente cuales son los espesores que se deberían utilizar al hacer otras pruebas, especialmente en el flujo de 0.144 m/s, 75 °C y 0.26 m/s, 60 °C, siendo para el primero aconsejable utilizar espesores mayores a 11 cm y para el segundo espesores mayores a 8.3 cm.

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

- 1.- Treybal Robert, "Operaciones de transferencia de masa", Mc Graw Hill Book Company Inc., 2^{da} Edición, 1980.
- 2.- Geankoplis Christie, "Unit Operations", Seally and Bacon series in Engineering, 2^{da} edición, 1983.
- 3.- Rossi Silvio y Roa Gonzalo, "Secado y almacenamiento de productos agropecuarios con el uso de energía solar y aire natural", Publicaciones ACIESP, 1980.
- 4.- Holman J.P., "Heat Transfer", Mc Graw Hill Book Company Inc., 5^{ta} Edición, 1981.
- 5.- Perry Robert y Chilton Cecil, "Manual del Ingeniero Químico", 2^{da} Edición, 1982.
- 6.- SINAC, "Pruebas de secado de cacao", Brasil, 1983.
- 7.- Conforme Jimmy, "Cálculo y diseño de un intercambiador de calor de un sistema de secado de granos", Proyecto de Grado, ESPOL, 1989.
- 8.- Kreith F., "Principios de Transferencia de Calor", Internacional Texbook Company, Pennsylvania, E.U.A., 1968.