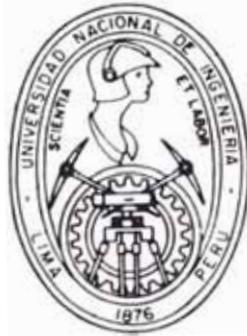


# Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**“ Diseño, Construcción y Ensayos del Banco  
Experimental de Secado de la Facultad  
de Ciencias - U. N. I. ”**

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECANICO**

**JOSE NICOLAS VILLEGAS GARCIA**

PROMOCION: 1983 - 2

**LIMA . PERU . 1991**

S I M B O L O S      Y      U N I D A D E S  
U T I L I Z A D A S

<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>	<u>Unidades</u>
1. A	Area de la superficie de secado	m <sup>2</sup>
2. c <sub>p</sub>	Calor específico	kJ/kg.°C
3. c <sub>p a</sub>	Calor específico del aire seco	kJ/kg.°C
4. c <sub>p v</sub>	Calor específico del vapor de agua	kJ/kg.°C
5. c <sub>p w</sub>	Calor específico del agua	kJ/kg.°C
6. c <sub>p p</sub>	Calor específico del producto	kJ/kg.°C
7. c <sub>p m</sub>	Calor específico del aire húmedo	kJ/kg.°C
8. de	Diámetro esférico equivalente	m
9. Dh	Diámetro hidráulico del ducto	m
10. Dv	Difusividad térmica del vapor	m <sup>2</sup> /hr
11. E	Porosidad o fracción de vacíos	Adimensional
12. f	Factor de fricción del ducto	Adimensional
13. f'	Factor de fricción modificado	Adimensional
14. f <sub>e</sub>	Factor empírico de rozamiento	Adimensional
15. g	Aceleración de la gravedad	m/s <sup>2</sup>
16. G	Velocidad másica del aire	kg/h.m <sup>2</sup>
17. G <sub>máx</sub>	Veloc. de la masa en el area mín.	lb/h.pie <sup>2</sup>
18. H	Humedad absoluta o cont. hum. aire	kg agua/kg a.s.
19. H'	Entalpia de un gas ideal	Kj
20. h <sub>a</sub>	Entalpia del aire seco (específica)	kJ/kg
21. h <sub>v</sub>	Entalpia especif. del vapor de agua	kJ/kg
22. h <sub>m</sub>	Entalpia especif. del aire húmedo	kJ/kg
23. h <sub>fg</sub>	Calor de vaporización del agua a la temperatura de rocío.	kJ/kg

24. $h_{fg_0}$	Calor latente de vaporización del agua a la temperatura $t_0$ . También se usa " $\lambda$ "	kJ/kg
25. $h_c$	Coefficiente de transmisión de calor por convección	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
26. $h_r$	Coefficiente de transmisión de calor por radiación	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
27. $h'_v$	Coefficiente de transmisión de materia	$kg/h \cdot m^2$
28. $h'$	Coefficiente convectivo de transmisión de materia	$kg/h \cdot m^2$
29. $h_p$	Pérdida de presión en ductos	mm.c.a.
30. $h_f$	Pérdida de presión por fricción	mm.c.a.
31. $h_s$	Pérdida de presión debido a los acces.	mm.c.a.
32. $h_{prod}$	Pérdida debido al paso del aire a través de un lecho de productos granular	mm.c.a.
33. $h_{est}$	Presión estática	mm.c.a.
34. $h_{sist}$	Caida de presión total en el sistema	mm.c.a.
35.	Conductividad térmica del aire	kcal/h.m. $^\circ C$
36. $k$	Coefficiente de resistencia	Adimensional
37. $k'$	Coefficiente de corrección por desviación de los gases ideales a altas pres.	Adimensional
38. $L$	Longitud	m
39. $L_e$	Longitud equivalente	m
40. $M$	Contenido de humedad base húmeda	kg agua/kg mat. húm.
41. $M$	Peso molecular	
42. $m$	Rapidez de transmisión de materia	kg/h
43. $m_h$	Masa de materia húmeda	kg
44. $m_{hi}$	Masa m.h. antes de iniciar el secado	kg
45. $m_{hf}$	Masa m.h. después del secado	kg
46. $m_s$	Masa de materia seca	kg
47. $m_v$	Fracción molar del vapor de agua	
48. $m_{sat}$	Fracción molar del vapor de agua en aire saturado	
49. $m_p$	Razón de secado	kg mat. húm/h
50. $m_s$	Razón de secado con referencia al sólido seco contenido en el material	kg mat. seca/h
51. $\dot{m}_a$	Flujo másico de aire	kg/s

52.	$m_w$	Flujo de agua a evaporar	kg agua/h
53.	$N$	Número de moles	
54.	$N_h$	Número de hileras transversales de tubos	
55.	$NUT$	Número de unidades de transferencia	Adimensional
56.	$p_t$	Presión total que ejerce el aire húmedo	kg/cm <sup>2</sup>
57.	$p_a$	Presión del aire seco	kg/cm <sup>2</sup>
58.	$p_v$	Presión parcial del vapor de agua	kg/cm <sup>2</sup>
59.	$p_{sup}$	Presión en la superficie del agua líq.	kg/cm <sup>2</sup>
60.	$p_{v\infty}$	Presión de vapor a la temperatura $t_\infty$	kg/cm <sup>2</sup>
61.	$p_{v\ bh}$	Presión de vapor a la temperatura $t_{bh}$	kg/cm <sup>2</sup>
62.	$p_{v_o}$	Presión de vapor dentro de la subcapa límite	kg/cm <sup>2</sup>
63.	$p_s$	Presión de vapor saturado	kg/cm <sup>2</sup>
64.	$PS$	Presión estática	kg/cm <sup>2</sup>
65.	$Pot$	Potencia de accionamiento del ventilad.	W
66.	$Q_a$	Energía que cede el aire	W
67.	$Q_{cal}$	Flujo de calor entregado por el aire para incrementar la temp. del producto	W
68.	$Q_{evap}$	Flujo de calor para evaporar el agua del producto	W
69.	$Q_e$	Energía que debe extraerse del aire	W
70.	$Re$	Número de Reynolds	Adimensional
71.	$Re'$	Número de Reynolds modificado	Adimensional
72.	$R_u$	Constante universal de los gases	J/g mol °K
73.	$S$	Peso de sólido seco	kg
74.	$T$	Temperatura absoluta	°K
75.	$t_{bs}$	Temperatura de bulbo seco	°C
76.	$t_{bh}$	Temperatura de bulbo húmedo	°C
77.	$t^*$	Temperatura termodinámica de bulbo húm.	°C
78.	$t_c$	Temperatura del punto de rocío	°C
79.	$t_o$	Temperatura de referencia para el agua líquida	°C
80.	$t_s$	Temperatura de superficie del cuerpo que se está secando	°C
81.	$t_{sal}$	Temperatura del aire al salir de la cámara de secado	°C

82.	U	Coeficiente total de transmisión de calor	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
83.	V	Velocidad del fluido	m/s
84.	$V_m$	Velocidad media	m/s
85.	V	Flujo volumétrico de aire	$m^3/s$ , (CFM)
86.	Vol	Volumen de agua líquida que se capta en el condensador	ml
87.	$V_t$	Volumen total	ml
88.	V	Volumen de los granos	ml
89.	$V_v$	Volumen de espacios vacios	ml
90.	W	Velocidad de secado	gr agua/s.m <sup>2</sup>
91.	W	Velocidad de secado constante	gr agua/s.m <sup>2</sup>
92.	$W_d$	Velocidad de secado decreciente	gr agua/s.m <sup>2</sup>
93.	$X_p$	Contenido de humedad base seca	kg agua/kg mat. seca
94.	$X_{eq}$	Contenido de humedad de equilibrio	kg agua/kg mat. seca
95.	$X_p$	Contenido de humedad inicial	kg agua/kg mat. seca
96.	$X_{p c}$	Contenido de humedad crítico	kg agua/kg mat. seca
97.	$X_p$	Contenido de humedad final	kg agua/kg mat. seca
98.	$\alpha$	Factor de forma	Adimensional
99.	$\alpha_a$	Difusividad térmica del aire	m <sup>2</sup> /h
100.	$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
101.	$\rho_m$	Densidad del aire húmedo	kg/m <sup>3</sup>
102.	$\delta$	Gravedad específica del gas seco	Adimensional
103.	$\theta$	Tiempo de secado	s
104.	$\theta_a$	Duración del secado, periodo antecrít.	s
105.	$\theta_p$	Duración del secado, periodo postcrít.	s
106.	$\phi$	Humedad relativa	%
107.	$\phi_v$	Densidad de flujo de vapor	kg/h.m <sup>2</sup>
108.	$\phi_t$	Densidad de flujo de calor	kcal/h.m <sup>2</sup>
109.	$\eta$	Eficiencia del ventilador y la transmisión juntas	Adimensional
110.	$\mu_a$	Viscosidad absoluta del aire	kg/m.s
111.	$\mu_s$	Viscosidad absoluta del fluido a la temperatura de superficie de los tubos	kg/m.s
112.	$\mu_b$	Viscosidad absoluta del fluido a la temperatura de mezcla	kg/m.s

113	$v_a$	Volumen de mezcla por kg de aire seco	$m^3/kg$ aire sec.
114	$v_m$	Volumen de mezcla por kg de mezcla	$m^3/kg$ mezcla
115	$\nu_a$	Viscosidad cinemática del aire	$m^2/s$
116	$\Delta p$	Pérdida de presión al pasar un fluido por un haz de tubos	$lb/pt^2$
117	$\tau$	Tensión	$kg\ m/m^2\ s^2$

## C O N T E N I D O

	página
Prólogo	15
1 Introducción	17
2 Propiedades del aire húmedo	
2.1 Aire húmedo	19
2.2 Ley de los gases ideales	21
2.3 Ecuación de Clausius Clapeyrón	22
2.4 Humedad relativa	22
2.5 Humedad absoluta o contenido de humedad del aire	23
2.6 Entalpía de un gas ideal	24
2.7 Entalpía específica del aire seco	25
2.8 Entalpía específica del vapor de agua a baja presión	25
2.9 Entalpía específica del aire húmedo	27
2.10 Calor específico del aire húmedo	28
2.11 Temperatura termodinámica de bulbo húmedo	28
2.12 Temperatura psicrométrica de bulbo húmedo	30
2.13 Humedad absoluta de aire no saturado	31
2.14 Volumen de mezcla por kilogramo de aire seco	31
2.15 Volumen de mezcla por kilogramo de mezcla	32
2.16 Densidad de un gas húmedo	32
2.17 Diagramas psicrométricos	33
2.18 Medición de la humedad del aire	35
2.19 Procesos de acondicionamiento de aire	37

	página
3 Teoria del secado	
3.1 Secado	44
3.1.1 Ley de la difusión	46
3.1.2 Transferencia de calor, de vapor de agua y de cantidad de movimiento entre un cuer po húmedo y el aire de secado	48
3.2 Cuerpo húmedo	50
3.3 Cuerpo higroscópico	51
3.4 Contenido de humedad del producto	51
3.4.1 Contenido de humedad base húmeda	51
3.4.2 Contenido de humedad base seca	52
3.5 Contenido de humedad de equilibrio	53
3.6 Isotermas de sorción o curvas de equilibrio	54
3.7 Velocidad de secado	56
3.8 Duración del secado en condiciones constantes	59
3.8.1 Duración del secado-periodo antecrítico	59
3.8.2 Duración del secado-periodo postcrítico	59
4 Descripción del banco experimental de secado	
4.1 Introducción	61
4.2 Componentes del banco experimental-descripción	63
4.2.1 Función de cada componente	64
4.2.1.1 Cuerpo principal del equipo de ensayo	65
4.2.1.2 Ventilador	65
4.2.1.3 Resistencia eléctrica	66
4.2.1.4 Radiador	67
4.2.1.5 Cámara de secado	67
4.2.1.6 Elemento de soporte del material a secar	68
4.2.1.7 Malla metálica de retención de ma - terial	68
4.2.1.8 Deshumedecedor	68
4.2.1.9 Compuerta reguladora del flujo de aire	69
4.2.1.10 Control automático electrónico de accionamiento del deshumedecedor	69

	página
4.2.2 Instrumentación	70
4.3 Funcionamiento del banco experimental	76
4.3.1 Funcionamiento del equipo para ensayos con aire caliente	78
4.3.2 Funcionamiento del equipo para ensayos con aire frío	80
5 Diseño y construcción del banco experimental	
5.1 Introducción	82
5.2 Consideraciones de diseño	83
5.2.1 Capacidad de la cámara de secado	83
5.2.2 Parámetros de secado	84
5.2.2.1 Temperatura del aire	85
5.2.2.2 Humedad relativa del aire	86
5.2.2.3 Flujo de aire	87
5.2.2.4 Características del material a secar	88
5.3 Dimensionamiento del banco experimental	89
5.3.1 Dimensiones de la cámara de secado y de los elementos de soporte de material	89
5.3.2 Dimensiones del cuerpo principal del equipo	94
5.4 Cálculo de pérdidas de presión	103
5.4.1 Definiciones y relaciones matemáticas	103
5.4.2 Caída de presión a través del sistema	113
5.4.3 Selección del ventilador	127
5.4.3.1 Clasificación y características de los ventiladores	127
5.4.3.2 Requerimientos del sistema	135
a Presión estática	135
b Flujo volumétrico de aire	136
b.1 Satisfaciendo la velocidad del aire requerida en la cámara de secado	137
b.2 Atendiendo las características o propiedades de los materiales secar	137
b.3 Atendiendo el balance térmico en la cámara de secado	146

	página
5.4.3.3 Potencia de accionamiento del ventilador	150
5.4.3.4 Tipo de ventilador a usar	151
5.5 Selección del deshumecedor	156
5.5.1 Cantidad de agua a evaporar	156
5.5.2 Cantidad total de energía que debe extraerse del aire	157
5.5.2.1 Balance térmico entre el aire de secado y el agua del intercambiador tipo parrilla	158
5.6 Partes complementarias	160
5.6.1 Sistema de control automático del deshumecedor	160
5.6.2 Elemento de humidificación	163
5.6.3 Fuente de luz para ensayos de secado mixto	165
6 Ensayos y resultados experimentales	
6.1 Programa	168
6.1.1 Ensayos del banco experimental	169
6.1.2 Ensayos de secado	170
6.2 Modelos matemáticos a usar	170
6.2.1 Velocidad media	171
6.2.2 Características físicas de los granos	172
6.2.2.1 Porosidad o fracción de vacíos	172
6.2.2.2 Diámetro esférico equivalente	173
6.2.2.3 Factor de forma	173
6.2.3 Contenido de humedad de equilibrio	173
6.2.4 Velocidad de secado	174
6.2.4.1 Velocidad de secado constante	175
6.2.4.2 Velocidad de secado decreciente	178
6.3 Resultados esperados	181
6.3.1 Parámetros del aire de secado	181
6.3.2 Ensayos de secado	182
6.3.2.1 Curvas de contenido de humedad de equilibrio	182

	página
6.3.2.2 Curvas de secado	187
6.3.3 Caída de presión en lecho de granos	189
6.4 Resultados obtenidos	189
6.4.1 Parámetros del aire de secado	190
6.4.1.1 Instrumentos utilizados	190
6.4.1.2 Procedimiento	191
6.4.1.3 Datos experimentales	192
6.4.2 Ensayos de secado	238
6.4.2.1 Curva de contenido de humedad de equilibrio	238
6.4.2.2 Curvas de secado	240
6.4.3 Ensayos de caída de presión y medición de presión estática	257
6.4.3.1 Instrumentos utilizados	257
6.4.3.2 Procedimiento	259
6.4.3.3 Datos experimentales	259
6.4.4 Ensayos complementarios	264
6.4.4.1 Caída de presión en lecho de granos	264
6.4.4.2 Porosidad y diámetro esférico equivalente	267
6.4.4.3 Propiedades del aire de secado y distribución de velocidad en el ducto	267
6.5 Comparación de resultados	271
6.5.1 Parámetros del aire de secado	271
6.5.2 Ensayos de secado	271
6.5.2.1 Curvas de contenido de humedad de equilibrio	271
6.5.2.2 Curvas de secado	272
6.5.3 Caída de presión del aire en un lecho de granos	272
Conclusiones	277
Bibliografía	
Planos	
Apéndice	

## P R O L O G O

El presente trabajo consta de seis capítulos, a través de los cuales se ha desarrollado la descripción, diseño y construcción del banco experimental de secado de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, los ensayos y resultados experimentales obtenidos en el equipo construido y por cierto los conceptos teóricos relativos a la teoría del secado, propiedades del aire húmedo y propiedades físicas de algunos productos.

En el capítulo de diseño del equipo experimental se realizan los cálculos y se desarrollan las pautas a seguir para la selección y dimensionamiento de los componentes del equipo. El método y los cálculos desarrollados son aplicables para el diseño de cualquier aparato en el que el secado sea por contacto directo del producto con una corriente de aire. En el apéndice G.1, se incluye el procedimiento y los parámetros requeridos para el secado de transformadores por el método de calentamiento externo mediante aire caliente.

La construcción y montaje del banco experimental se rea

lizó con materiales y herramientas del taller de mecánica de la Facultad de Ciencias de la U.N.I, a excepción del cuerpo principal construido con planchas de fierro galvanizado cuya construcción se encargó a un taller particular.

En la parte experimental, capítulo 6 del presente trabajo, se presentan las pruebas del banco experimental y los ensayos de secado. Con las pruebas del equipo se conocen los parámetros del aire de secado que puede lograrse a distintas condiciones de funcionamiento del mismo y con los ensayos de secado se construyen curvas experimentales, que serán comparadas con las obtenidas con modelos matemáticos.

El autor agradece a todas las personas que han colaborado en la elaboración de este trabajo y de manera especial a los ingenieros Rafael Espinoza P. y Anibal Valera, por sus valiosos consejos y sugerencias.

José N. Villegas García

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

Desde mucho tiempo atrás se practica en nuestro país el secado de productos agrícolas con la finalidad de evitar su deterioro o para lograr una mejor utilización de un determinado producto.

En la actualidad, un gran porcentaje de las prácticas de secado se hacen a la intemperie y sin ninguna consideración tecnológica, teniendo como consecuencia un resultado ineficiente y representando un problema de cuya solución depende el aprovechamiento de los excesos de producción en determinadas estaciones del año o una más rápida obtención de producto apto a ser consumido, caso del café, cacao, polen, etc.

Cabe mencionar también, que el secado no solo se emplea para productos agrícolas sino que también es una operación muy importante en muchas industrias químicas y de transformación.

Actualmente se está impulsando el desarrollo tecnológi

co en este campo y ya se han hecho trabajos al respecto, por ejemplo los realizados por el ITINTEC y los que se vienen realizando en algunas universidades del país.

El presente trabajo de tesis, se realiza con la finalidad de servir de apoyo a los trabajos relacionados con secadores solares de productos agrícolas destinados a las regiones rurales del Perú. Forma parte del proyecto "Desarrollo de secadores solares para productos agrícolas y alimenticios". Este proyecto tiene el apoyo económico de la República Federal de Alemania a través de la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ).

El trabajo consiste en diseñar y construir el equipo experimental de secado. Se espera que los resultados experimentales obtenidos sean similares a los obtenidos de bibliografía especializada para tener la certeza que en él se obtendrán datos confiables.

El equipo será implementado para simular operaciones de secado en secadores de tipo indirecto y mixto, pero los ensayos realizados abarcan solo lo referente a secadores de tipo indirecto.

## C A P I T U L O 2

### PROPIEDADES DEL AIRE HUMEDO

En un proceso de secado cumple un rol fundamental el aire de secado, es entonces necesario conocer muy bien las propiedades del aire húmedo y su comportamiento durante la operación de secado.

#### 2.1 Aire húmedo

Se dice que el aire es húmedo cuando además de las moléculas de aire seco existen moléculas de agua (vapor de agua).

La ley de los gases ideales, para cada componente, y la ley de Dalton de presiones parciales para una mezcla puede aplicarse con seguridad para el aire húmedo. Por tanto la presión total que ejerce el aire húmedo ( $p_t$ ) es la suma de la presión del aire seco ( $p_a$ ) más la presión parcial que ejerce el vapor de agua ( $p_v$ ). Ver figura 2.1.

Cuando en un ambiente cerrado colocamos una cantidad de agua, la presión de vapor de agua en el aire encerrado puede ser en general diferente de la presión del agua en

estado líquido.

Si la presión parcial de vapor en el aire es menor que la presión en la superficie del agua líquida ( $p_{sup}$ ) ocurre evaporación. Si es mayor ocurre condensación y si ambas presiones son iguales no ocurre ni evaporación ni condensación, el sistema está en equilibrio y se dice que el aire está saturado. Ver figura 2.2.

Cuando el sistema está en equilibrio la presión del aire es la presión de vapor saturado.

La presión de vapor saturado depende únicamente de la temperatura, siendo independiente por tanto de la cantidad de aire encerrado.

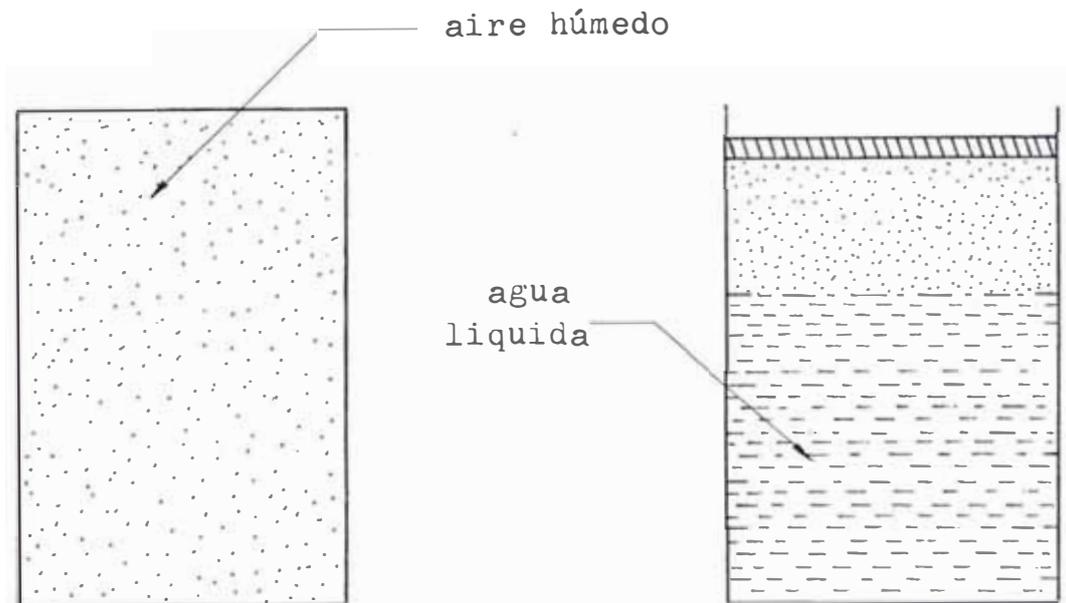


Figura 2.1 Muestra de  
aire húmedo

Figura 2.2 Sistema líquido-  
vapor en equilibrio

## 2.2 Ley de los gases ideales

A presiones reducidas y temperaturas suficientemente elevadas, en ausencia de reacción química, todos los gases se aproximan a una condición tal que sus propiedades presión (p), volumen (v) y temperatura (T) pueden expresarse por :

$$p v = R T \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Esta ley es aplicable a una mezcla de aire húmedo, en la cual si v se expresa como volumen por unidad de peso, el valor de la constante R será diferente para los distintos gases. Si v se expresa como el volumen de un peso molecular del gas entonces la constante será  $R_u$  y es igual para todos los gases en cualquier sistema de unidades que se elija (constante universal de los gases).

$$R = \frac{R_u}{M} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

La ecuación (2.1) la podemos expresar como :

$$p v = N \bar{M} R T$$

Donde : v : volumen total del gas

N : número de moles de gas que hay en v

$\bar{M}$  : peso molecular

$R_u$  :  $M R$  , es la constante universal de los gases

Para los gases ideales la constante universal  $R_u$  tiene el mismo valor. A continuación se da los valores de  $R_u$  en distintas unidades.

$$\begin{aligned} 1546 \frac{\text{pies. lb fza}}{\text{lb mol. } ^\circ\text{R}} \\ 8.314 \frac{\text{J}}{\text{g mol } ^\circ\text{K}} \\ 1.987 \frac{\text{g}}{\text{lb mol } ^\circ\text{R}} \end{aligned}$$

Las propiedades de los gases ideales se relacionan generalmente con más facilidad sobre la base del mol. Una libra mol es el peso en libras igual al peso molecular, un gramo mol es el peso en gramos igual al peso molecular, además a la misma presión y temperatura, el volumen de un mol es igual para todos los gases ideales.

### 2.3 Ecuación de Clausius Clapeiron

Ecuación importante para obtener la presión de vapor saturado a partir de la temperatura.

$$p_s = \exp\left( 51.691 - \frac{6436}{T} - 3.68 \ln T \right) \dots (2.4)$$

Donde :  $p_s$  : presión de vapor saturado (pascal)

$T$  : temperatura del aire ( $^\circ\text{K}$ )

### 2.4 Humedad relativa ( $\phi$ )

Se define como el cociente de la fracción molar del vapor de agua en el aire ( $m_v$ ) entre la fracción molar de vapor de agua en aire saturado ( $m_{sat}$ ) a la misma temperatura

$$\phi = \frac{m_v}{m_{sat}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Debido a que el aire húmedo tiene un comportamiento muy cercano al de un gas ideal podemos expresar la humedad relativa como la razón de la presión de vapor real a la presión de vapor saturado a la misma temperatura.

$$\phi = \frac{p_v}{p_s} \dots\dots\dots (2.6)$$

Debemos notar que la humedad relativa es solamente una propiedad del vapor, no tiene relación con el hecho de que el vapor se encuentre mezclado con el aire. Es un método para expresar el alejamiento del vapor de agua con respecto a la saturación y se utiliza corrientemente como una medida de la capacidad del aire para absorber aquella cantidad de agua que le falta para saturarse.

2.5 Humedad absoluta o contenido de humedad del aire (H)

Se define la humedad absoluta como la masa de vapor de agua contenida en una masa de aire seco, ambos contenidos en un mismo volumen.

$$H = \frac{m_v}{m_a} \dots\dots\dots (2.7)$$

Al igual que en la humedad relativa, la humedad absoluta se puede relacionar con la presión parcial del vapor de agua en el aire  $p_v$  por medio de la ecuación

$$H = 0.621 \frac{p_v}{(p_t - p_v)} \dots\dots\dots (2.8)$$

Donde : H : humedad absoluta del aire, kg agua/kg a.s  
p<sub>v</sub> : presión parcial del vapor de agua, kg/cm<sup>2</sup>  
p<sub>t</sub> : presión total del aire, kg/cm<sup>2</sup>

La ecuación (2.8) también se puede expresar como :

$$H = 0.621 \frac{p_s \phi}{p_t - p_s \phi} \dots\dots\dots(2.9)$$

Cuando p<sub>v</sub> es muy pequeña en comparación con p<sub>t</sub> y si p<sub>t</sub> ≈ 1 atm, la ecuación (2.9) se reduce a :

$$H = 0.621 p_v \dots\dots\dots(2.10)$$

En el caso de que el aire de secado esté saturado, la humedad relativa es φ = 1 y p<sub>v</sub> = p<sub>s</sub>, reemplazando estas igualdades en la ecuación (2.8), tendremos :

$$H_s = 0.621 \frac{p_s}{p_t - p_s} \dots\dots\dots(2.11)$$

Donde : H<sub>s</sub> : humedad absoluta del aire saturado,  
kg agua/kg a.s

p<sub>s</sub> : presión de vapor saturado, kg/cm<sup>2</sup>. Se halla de tablas de vapor saturado.

p<sub>t</sub> : presión total del aire saturado, kg/cm<sup>2</sup>

## 2.6 Entalpía de un gas ideal (H')

Si un gas ideal cambia de un estado inicial p<sub>1</sub>, v<sub>1</sub>, t<sub>1</sub> a otro final p<sub>2</sub>, v<sub>2</sub>, t<sub>2</sub>, manteniéndose su calor específico c<sub>p</sub>, constante, se cumple que :

$$H'_2 - H'_1 = m c_p (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(2.12)$$

Donde :  $H'$  : entalpía del gas ideal, kj

$m$  : masa del gas ideal, kg

$c_p$  : calor específico constante, kj/kg °K

$T$  : temperatura del gas, °K

## 2.7 Entalpía específica del aire seco ( $h_a$ )

La entalpía específica del aire a una temperatura  $t^\circ\text{C}$  es :

$$h_a = c_{p a} (t - t_o) \dots\dots\dots (2.13)$$

Donde :  $c_{p a}$  : calor específico del aire seco

$t_o$  : temperatura de referencia

El aire seco tiene su calor específico aproximadamente constante entre  $-70$  y  $125^\circ\text{C}$ , su valor es  $0.24 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$  ( $1.004 \text{ kj/kg}^\circ\text{K}$ ). La temperatura de referencia se considera igual a  $0^\circ\text{F}$  ( $-17.77^\circ\text{C}$ ) valor para el cual su entalpía es cero. Reemplazando estos valores, la ecuación (2.13) se transforma en

$$h_a = 0.24 (t + 17.77) ; (\text{kcal/kg}) \dots\dots\dots(2.14)$$

$$h_a = 1.004(t + 17.77) ; (\text{ kj/kg}) \dots\dots(2.14.a)$$

donde :  $t$  : temperatura del aire en °C

## 2.8 Entalpía específica del vapor de agua a baja presión ( $h_v$ )

La entalpía específica del vapor de agua a baja pre-

si3n, sea saturado o sobrecalentado es casi independiente de la presi3n de vapor y depende solamente de la temperatura de bulbo seco.

La entalpía por kilogramo, del vapor sobrecalentado  $t - t_c$  grados sobre la temperatura del punto de rocío es igual a la suma de la entalpía del vapor sobrecalentado, la entalpía de evaporaci3n a la temperatura de rocío y la entalpía del agua a la temperatura de rocío, es decir :

$$h_v = c_{p v} (t - t_c) + h_{fg} + c_{p w} (t_c - t'_o) \dots (2.15)$$

Donde :  $c_{p v}$  : calor específcico del vapor de agua

$$0.44 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \quad (1.84 \text{ kj/kg}^\circ\text{C})$$

$c_{p w}$  : calor específcico del agua, 1 kcal/kg $^\circ\text{C}$

$$(4.186 \text{ kj/kg}^\circ\text{C})$$

$t_c$  : temperatura del punto de rocío,  $^\circ\text{C}$

$h_{fg}$  : calor de vaporizaci3n del agua a la temperatura de rocío

$t'_o$  : temperatura de referencia para el agua líquida.

La ecuaci3n (2.15) es la expresi3n general para la entalpía del vapor de agua, sin embargo han sido desarrolladas ecuaciones simplificadas suficientemente exactas para cálculos de secado de granos, así, la ecuaci3n (2.15) puede expresarse :

$$h_v = c_{pv} (t - t'_o) + h_{fg_o} \dots \dots \dots (2.16)$$

Donde :  $h_{fg_0}$  es el calor latente de vaporización del agua a la temperatura de referencia  $t'_0$ .

La temperatura a la cual la entalpía del agua líquida es cero es  $32^\circ\text{F}$  ( $0^\circ\text{C}$ ), este valor es considerado como la temperatura de referencia. Además el calor de vaporización del agua a  $0^\circ\text{C}$  es  $597.7 \text{ Kcal/Kg}$  ( $2502 \text{ Kj/Kg}$ ), luego la ecuación (2.16) se transforma en :

$$h_v = 0.44 t + 597.7 ; \text{ ( kcal/kg) } \dots\dots(2.17)$$

$$h_v = 1.84 t + 2502 ; \text{ (kj/kg) } \dots\dots(2.17.a)$$

Donde :  $t$  : temperatura del vapor de agua;  $^\circ\text{C}$ .

### 2.9 Entalpía específica del aire húmedo ( $h_m$ )

El aire húmedo es una mezcla de aire seco y vapor de agua, su entalpía específica se determina por la ecuación:

$$h_m = h_a + H h_v \dots\dots\dots(2.18)$$

Reemplazando las ecuaciones de  $h_a$  y  $h_v$  se tiene :

$$h = 0.24 (t + 17.77) + H (0.44 t + 597.7); \text{ (kcal/kg)} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$h = 1.004 (t + 17.77) + H (1.84 t + 2502); \text{ (kj/kg) } \dots\dots\dots(2.19.a)$$

Donde :  $t$  : temperatura de bulbo seco;  $^\circ\text{C}$ .

## 2.10 Calor específico del aire húmedo ( $c_{p m}$ )

El calor específico de una mezcla de aire seco y vapor de agua puede llamarse calor húmedo específico y se calcula mediante la siguiente ecuación :

$$c_{p m} = 0.24 + 0.44 H ; \quad (\text{kcal/kg } ^\circ\text{K}) \dots\dots(2.20)$$

$$c_{p m} = 1.004 + 1.84 H ; \quad (\text{kJ/kg } ^\circ\text{K}) \dots\dots(2.20.a)$$

Donde : H : humedad absoluta del aire húmedo; decimal.

## 2.11 Temperatura termodinámica de bulbo húmedo ( $t^*$ )

La temperatura termodinámica de bulbo húmedo o temperatura de saturación adiabática ( $t^*$ ), es una propiedad muy importante de las mezclas de aire seco y vapor sobrecalentado. Es la temperatura a la que el agua mediante un proceso adiabático y por evaporación haría alcanzar la saturación a una mezcla aire vapor. Ver figura 2.3.

El proceso consiste en hacer fluir en un recinto aislado térmicamente una mezcla aire vapor, en contracorriente a una circulación continua de corriente de agua. La evaporación del agua producida por el descenso de la temperatura de la mezcla, hace que ésta abandone el recinto completamente saturada. La temperatura alcanzada es la temperatura termodinámica de bulbo húmedo.

Un lecho profundo de granos húmedos, en un proceso de secado, puede actuar por un tiempo como un recinto adiabático y la temperatura del aire a la salida del lecho es a-

proximadamente la temperatura termodinámica de bulbo húmedo  $t^*$ .

La diferencia entre la temperatura de saturación adiabática y la temperatura de bulbo húmedo psicrométrica, es suficientemente pequeña por lo que esta última es la que se emplea en los cálculos de secado.

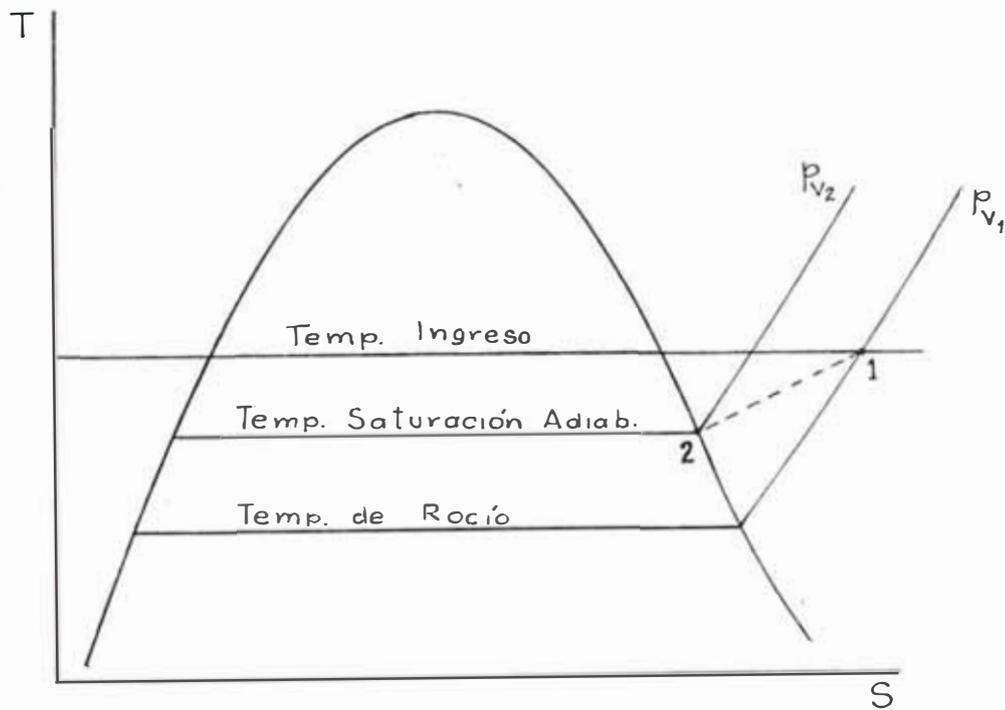
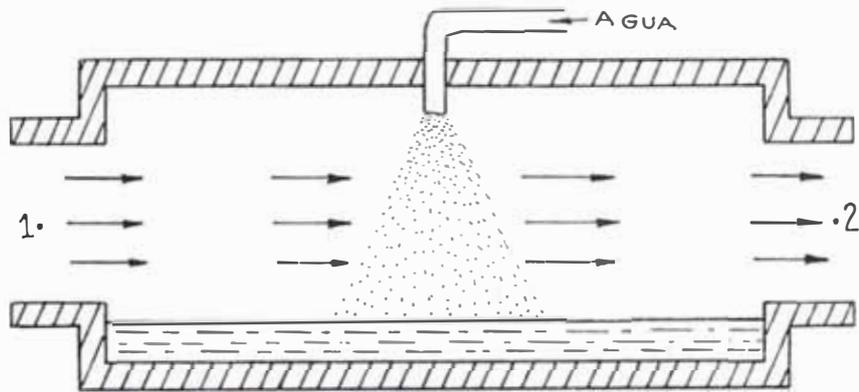


Figura 2.3 Proceso de saturación adiabática

## 2.12 Temperatura psicrométrica de bulbo húmedo ( $t_{bh}$ )

Si se pasa aire sin saturar sobre una superficie líquida parte del líquido se evapora y la temperatura de la superficie disminuye, a continuación se transmite calor a la superficie desde la corriente de aire y se establece un equilibrio entre la velocidad de transmisión de calor y la velocidad de evaporación. La temperatura de equilibrio que alcanza la superficie se denomina temperatura psicrométrica de bulbo húmedo y depende de la temperatura, humedad y flujo de aire.

La cantidad de calor transferido del aire a temperatura  $T_\infty$  al paño a  $T_{bh}$ , despreciando la radiación a la atmósfera y conducción a lo largo del termómetro, es para un área  $A$  de paño igual a :

$$q = h_c A (T_\infty - T_{bh}) \dots\dots\dots(2.21)$$

Donde :  $h_c$  : coeficiente convectivo de transferencia de calor.

La transferencia de masa del paño al aire es debido a la diferente presión parcial que existe entre la capa límite del paño y la corriente de aire. La cantidad de agua evaporada es :

$$\dot{m}_w = \frac{h' A \bar{M}}{R_u T} (p_{v_{bh}} - p_{v_\infty}) \dots\dots\dots(2.22)$$

$$\dot{m}_w = \frac{h_c A (T_\infty - T_{bh})}{h_{fg}} \dots\dots\dots(2.22.a)$$

Donde :  $\dot{m}_w$  : flujo de agua evaporada

$h'$  : coeficiente convectivo de transferencia de ma  
sa.

$\bar{M}$  : peso molecular del agua.

$p_{v_{bh}}$  : presión del vapor a la temperatura  $T_{bh}$  .

$p_{v_{\infty}}$  : presión del vapor a la temperatura  $T_{\infty}$  .

$R_u$  : constante universal de los gases.

$T$  : temperatura absoluta del aire.

$h_c$  : coeficiente convectivo de transferencia de ca  
lor.

$h_{fg}$  : calor de evaporación.

### 2.13 Humedad absoluta de aire no saturado (H)

Mediante un proceso de saturación adiabática (ver fi  
gura 2.3), con la medición de la temperatura inicial  $t_1$  y  
la temperatura de saturación adiabática  $t^*$ , se puede deter  
minar la humedad absoluta del aire al ingreso.

$$H_1 = H_2 - \frac{c_{p m} (t_1 - t^*)}{h_{fg}^*} \dots\dots\dots(2.23)$$

Donde :  $H_1$  : humedad absoluta del aire húmedo no saturado

$H_2$  : humedad absoluta del aire para la saturación,  
calculada mediante la ecuación 2.11, a  $t^*$

$c_{p m}$  : calor específico de la mezcla aire vapor  
calculada mediante la ecuación 2.20

$h_{fg}^*$  : calor latente de vaporización a  $t^*$

### 2.14 Volumen de mezcla por kilogramo de aire seco ( $\sqrt{a}$ )

A partir de la ecuación universal de los gases idea-

les se deduce :

$$\sqrt{a} = 2.929 \cdot 10^{-3} \frac{(t_{bs} + 273)}{(p_t - p_v)} \dots\dots\dots(2.24)$$

Donde :  $\sqrt{a}$  : volumen de mezcla por kilogramo de aire seco;  
 $m^3/kg$  aire seco.

$t_{bs}$  : temperatura de bulbo seco; °C

$p_t$  : presión total;  $kg/cm^2$

$p_v$  : presión de vapor saturado a la temperatura

$t_{bs}$ , se obtiene de tablas de vapor saturado.

### 2.15 Volumen de mezcla por kilogramo de mezcla ( $\sqrt{m}$ )

$$\sqrt{m} = \frac{\sqrt{a}}{1 + H} \dots\dots\dots(2.25)$$

Donde :  $\sqrt{m}$  : volumen de mezcla por kilogramo de mezcla;  
 $m^3/kg$  mezcla.

H : humedad absoluta;  $kg$  agua/ $kg$  aire seco.

### 2.16 Densidad de un gas húmedo ( $\rho_{gas}$ )

De la ecuación universal de los gases, ecuación 2.8 y ecuación 2.25, se deduce la ecuación general para hallar la densidad de un gas húmedo.

$$\rho_{gas} = 341.413 \left[ \frac{\delta}{k' T} (p_t - p_v) + 0.621 \frac{p_v}{T} \right] \dots(2.26)$$

Donde :  $\rho_{gas}$  : densidad del gas húmedo;  $kg/m^3$

$\delta$  : gravedad específica del gas seco;  $\rho_{gas}$  seco/ $\rho_{as}$

$k'$  : coeficiente de corrección por desviación de la ley de los gases ideales a altas presiones.

$p_t$  : presión absoluta;  $kg/cm^2$

$p_v$  : presión parcial del vapor de agua;  $kg/cm^2$

T : temperatura absoluta; °K

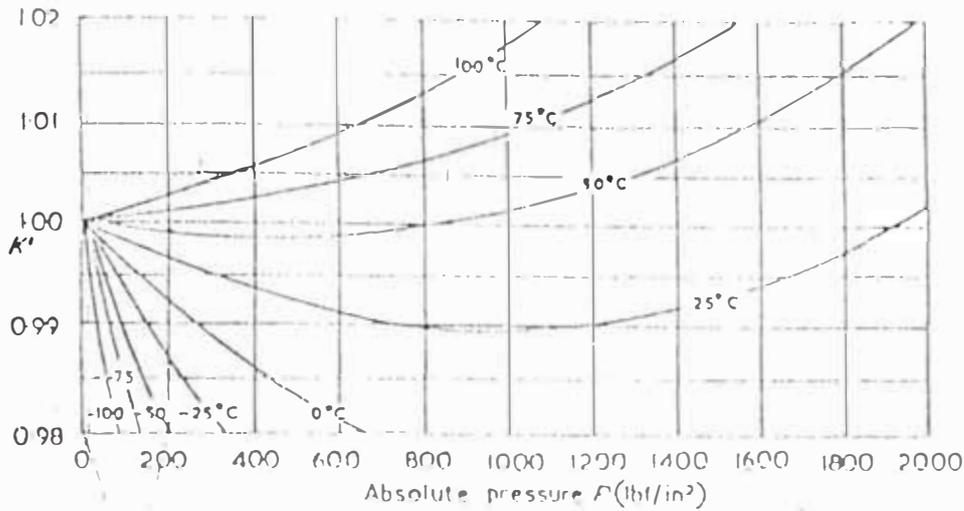


Figura 2.4 Valores del factor de corrección  $k'$  para el aire. Fuente : Ref. N° 15

Para aire húmedo a bajas presiones, la gravedad específica  $\delta$  y el coeficiente de corrección  $k$  son iguales a la unidad, (ver figura 2.4). Reemplazando estos valores en la ecuación 2.26, se obtiene la densidad del aire húmedo  $\rho_m$ .

$$\rho_m = \frac{341.413}{T} \left[ (p_t - p_v) + 0.621 p_v \right] \dots\dots(2.27)$$

### 2.17 Diagramas psicrométricos

En análisis de problemas de secado frecuentemente son necesarios los datos de las propiedades termodinámicas del aire húmedo. Existen diagramas especiales que contienen los valores de las propiedades más comunes y son los llamados diagramas o cartas psicrométricos. En la figura 2.5, se presenta un diagrama simplificado.

Para uso ocasional, las ecuaciones algebraicas son me

nos confusas y más realistas. Para el uso frecuente, una carta psicrométrica puede ser más conveniente.

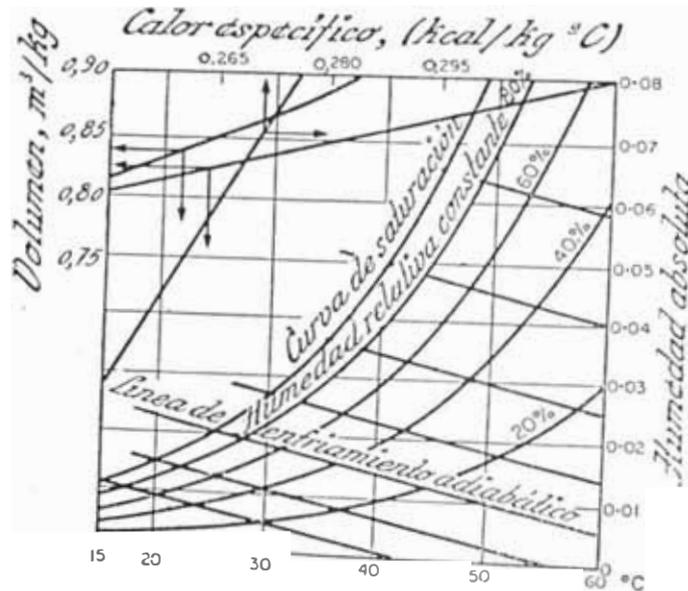


Figura 2.5 Diagrama psicrométrico simplificado

Fuente : Ref. bibliográfica N. 8

La presión de vapor de saturación del agua depende de la temperatura. Si se aumenta la temperatura crece la presión de vapor de saturación. Es por esto que si se aumenta la temperatura de una muestra de aire y no se añade o quita agua (es decir a humedad absoluta constante), su humedad relativa decrece. De la misma manera si se disminuye la temperatura, la humedad relativa aumentará. Si la temperatura disminuye suficientemente el aire se saturará y si se disminuye más todavía se separará agua condensada.

Se denomina temperatura del punto de rocío a aquella a la cual se separa agua por condensación a una humedad relativa y presión dadas.

Hay distintos tipos de diagramas psicrométricos en uso,

éstos se diferencian por el rango de temperaturas, número de propiedades termodinámicas que incluye y el factor más importante por el que se pueden diferenciar dos cartas psicrométricas, la presión atmosférica a la cual ha sido construidas. Por tanto un diagrama psicrométrico es aplicable solo a una presión atmosférica determinada.

#### 2.18 Medición de la humedad del aire

Se emplean muchos métodos para medir la humedad del aire. Un método consiste en medir las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire y con ayuda del diagrama psicrométrico determinar la humedad relativa.

La obtención de la temperatura de bulbo húmedo psicrométrica se menciona en el punto 2.12 y la temperatura del aire tal como lo indica un termómetro ordinario, sin tejido de algodón humedecido en el bulbo, es la temperatura de bulbo seco.

También se puede medir la humedad del aire haciendo uso de los instrumentos denominados higrómetros o psicrómetros.

Los tipos más comunes de psicrómetros son :

- a) Medidores del punto de rocío
- b) Higrómetro de cabello
- c) Higrómetro de resistencia eléctrica
- d) Higrómetro de cloruro de litio

- a) Medidores del punto de rocío Miden la temperatura de saturación o punto de rocío enfriando una muestra de aire hasta que tenga lugar la condensación. Luego se usa la carta psicrométrica, por ejemplo una muestra de aire a 25°C, empieza a condensarse cuando esta se enfría a 10°C, la gráfica nos muestra que la humedad relativa del aire es 40%.
- b) Higrómetro de cabello El funcionamiento de estos instrumentos se basa en la propiedad que poseen los cabellos de alargarse y acortarse según la variación de la humedad del medio que los rodea. Los aparatos se construyen de forma que permitan medir exactamente la longitud del cabello y por tanto sean calibrables a diferentes humedades. En lugar de cabello humano algunas veces se usa otro material higroscópico como madera o papel. Estos instrumentos son sencillos y baratos pero requieren de calibración frecuente. La precisión raramente llega a ser mejor del 3 %.
- c) Higrómetro de resistencia eléctrica El principio de funcionamiento de estos aparatos se basa en el hecho de que algunas sustancias varían su resistencia eléctrica superficial según cual sea la humedad del aire que los rodea. Ejemplos de estas sustancias son el óxido de aluminio, los polímeros de fenol-formaldehído y polímeros de estireno.

Por calibración se pueden conocer humedades a partir de medidas de resistencias.

- d) Higrómetro de cloruro de litio En estos instrumentos se mantiene una disolución de cloruro de litio a una temperatura tal que su presión parcial sea igual a la presión parcial del vapor de agua contenido en el aire. Para conocer la humedad del aire se utilizan expresiones o gráficas de presión de vapor-temperatura para el cloruro de litio. El análisis químico puede emplearse para estándares preliminares de mediciones de humedad, utilizando desecadores como el ácido sulfúrico, pentóxido de fósforo, cloruro de litio o silicagel.

## 2.19 Procesos de acondicionamiento de aire

El conocimiento de los procesos elementales de acondicionamiento de aire es importante para evaluar los cambios que sufre el aire durante una operación de secado. A continuación se presentan algunos de estos procesos y se grafican en la carta psicrométrica para una mejor ilustración de los mismos.

- a) Calentamiento y enfriamiento por encima del punto de rocío

Durante el calentamiento o enfriamiento por encima del punto de rocío no se produce condensación del vapor de agua, las presiones parciales y el contenido de humedad permanecen constantes.

El calor es agregado o extraído del aire en un colector o un intercambiador de calor respectivamente.

Este proceso se representa en la carta psicrométrica por líneas horizontales como puede observarse en la figura 2.6.

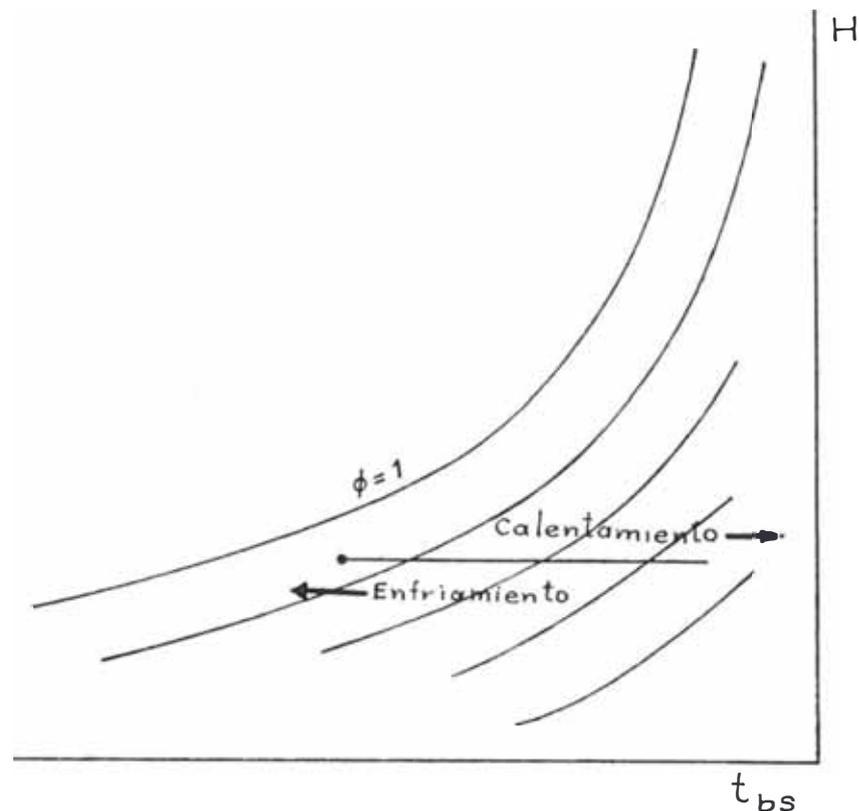


Figura 2.6 Proceso de calentamiento o enfriamiento por encima del punto de rocío.

b) Enfriamiento por humidificación El secado de productos puede ser considerado

como un proceso adiabático lo que significa que el calor requerido para la evaporación del agua es suministrado solo por el aire sin transferencia de calor por conducción o radiación desde los alrededores.

Al pasar el aire por el producto húmedo, una gran parte de su energía térmica es usada como calor latente de vaporización, motivo por el cual se incrementa el va-

por de agua en el aire.

Si el aire pierde calor al exterior el enfriamiento no será adiabático, sino que se efectuará a lo largo de una línea como la  $1-2_a$ . Si por el contrario recibe calor, por radiación por ejemplo, la línea de operación para el aire será como la  $1-2_b$ . Ver figura 2.7.

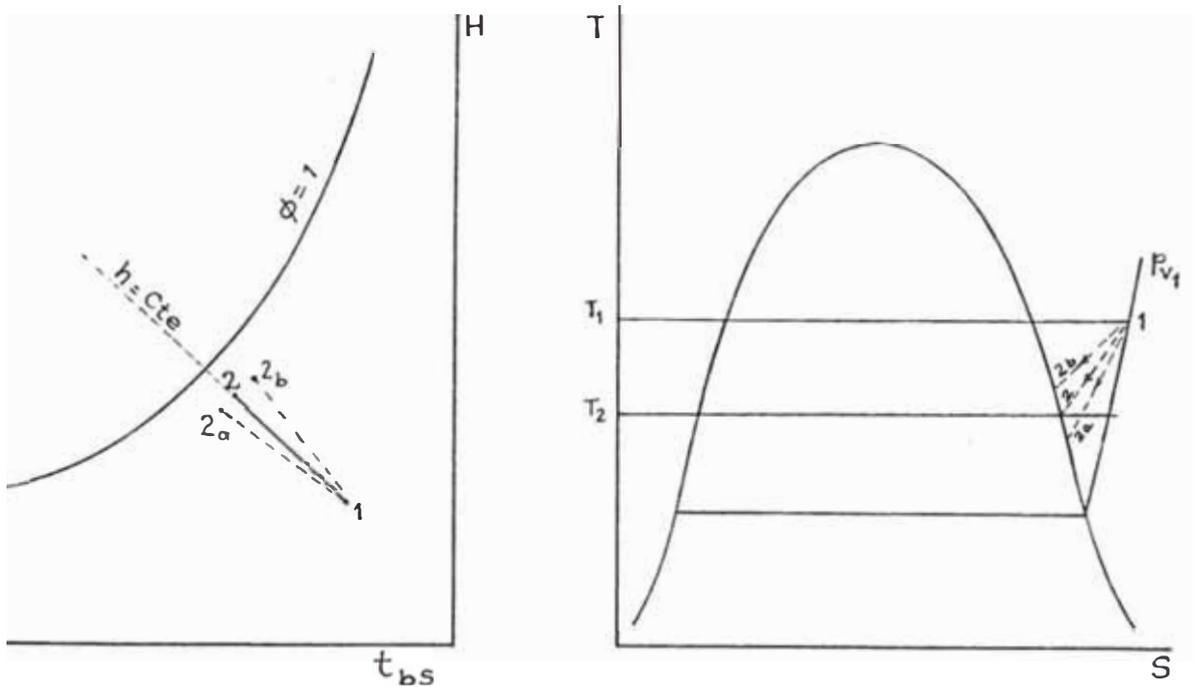


Figura 2.7 Proceso de enfriamiento por humidificación

c) Precaentamiento y secado mixto En el proceso de secado mixto el aire es primero precalentado manteniendo su humedad absoluta constante y luego llevado a la cámara de secado donde se encuentran los productos húmedos. En este caso la cámara de secado tiene un cobertor transparente de manera que el aire y el producto reciben energía térmica y por tanto la temperatura de bulbo seco en la cámara tiende a permanecer constante durante el proceso.

Este proceso es más eficiente que los dos anteriores juntos, pues con un menor precalentamiento teóricamente se podría remover mayor cantidad de humedad. Figura 2.8.

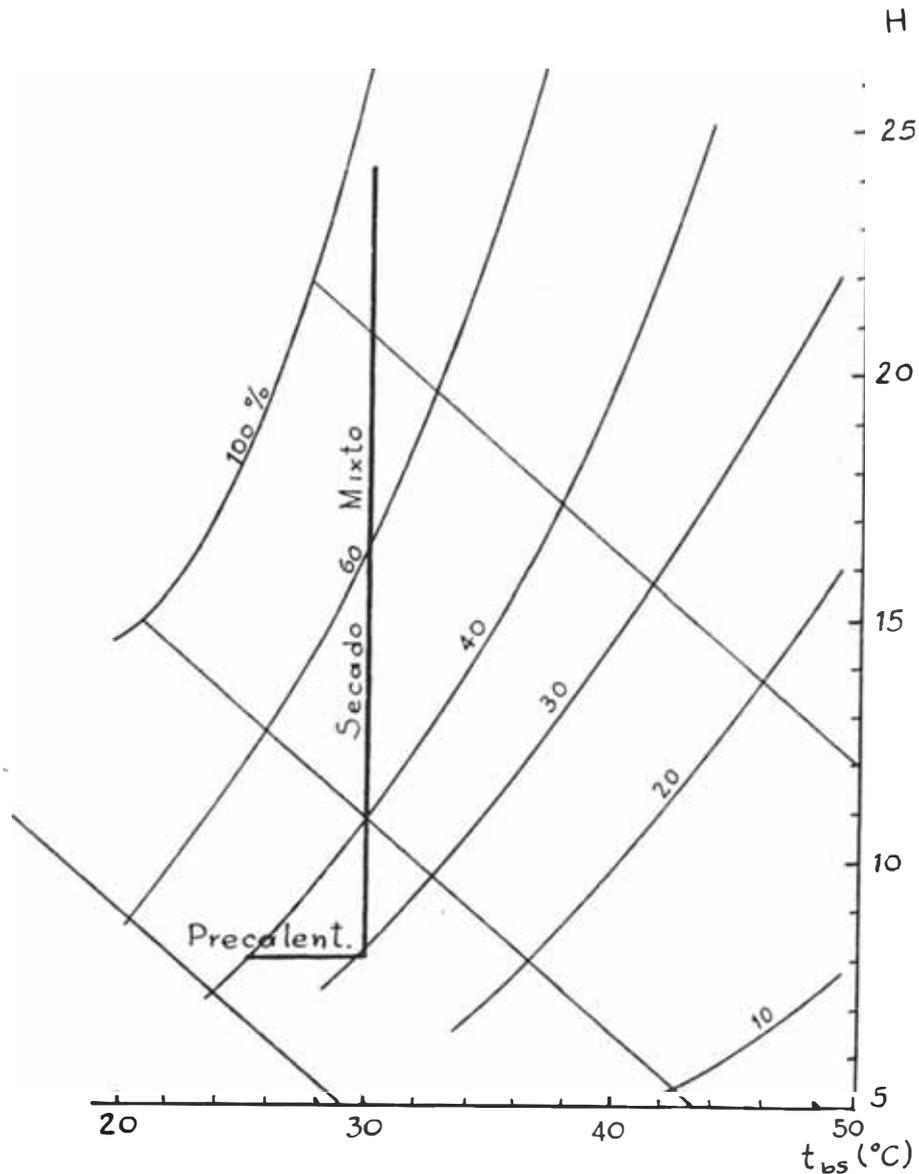


Figura 2.8 Proceso de precalentamiento y secado mixto

d) Enfriamiento por debajo del punto de rocío o deshumidificación

En este proceso el aire es enfriado hasta la saturación manteniendo las presiones parciales constantes; luego el enfriamiento continúa y empieza la condensación de vapor. Al final se tiene que la presión del

vapor de agua y el contenido de humedad del aire han disminuido.

La deshumidificación puede llevarse a cabo haciendo pasar el aire húmedo a través de una superficie enfriadora consistente en tubos con salmuera o refrigerante circulando en su interior. En la figura 2.9 se ilustra el proceso.

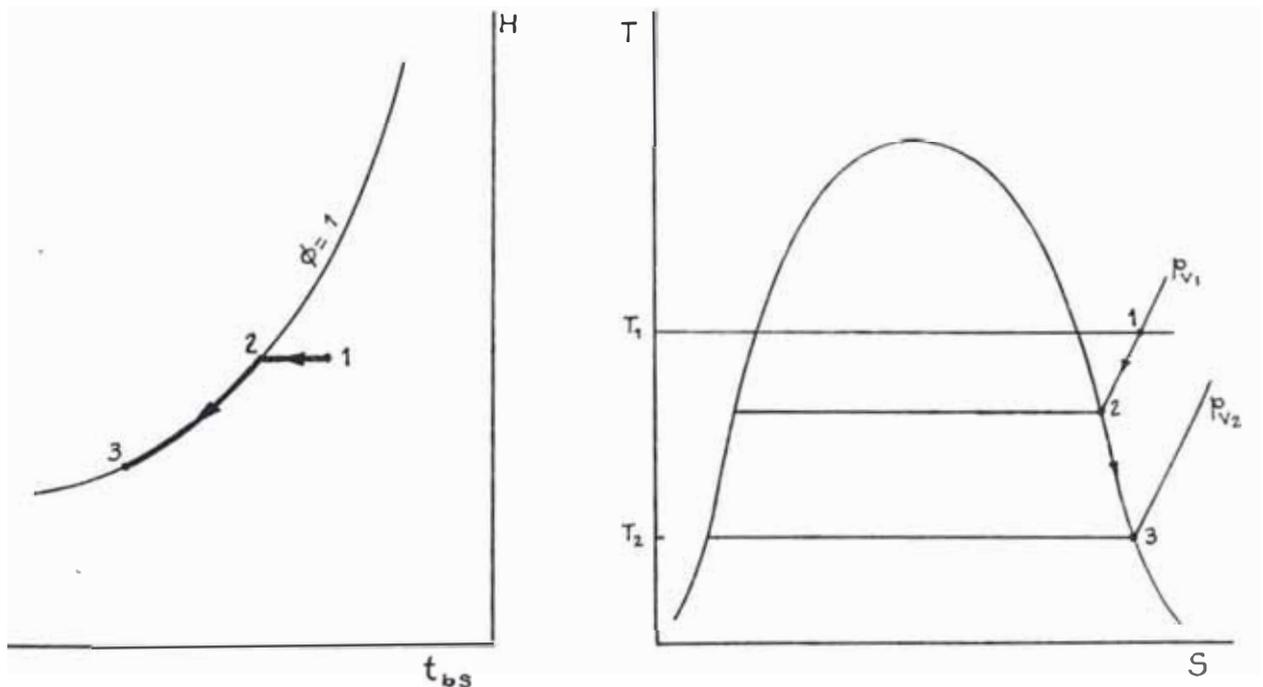


Figura 2.9 Proceso de deshumidificación

e) Calentamiento con aumento de humedad Este proceso se presenta con mucha frecuencia en los sistemas convencionales de calentamiento del aire de secado en los cuales la energía que se añade al aire se consigue por combustión directa del combustible en el aire.

En este caso además de añadir calor al aire, una pequeña cantidad de vapor de agua es incrementada.

En la figura 2.10 se puede apreciar como se incrementa la humedad y la temperatura del aire durante el proceso.

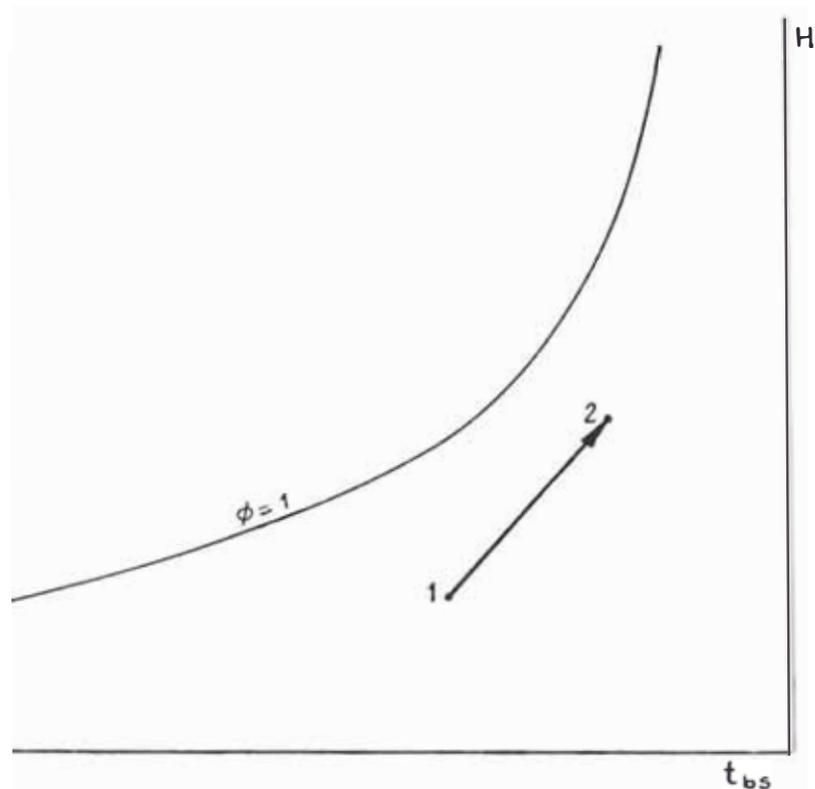


Figura 2.10 Proceso de calentamiento con aumento de humedad

f) Precaentamiento, humidificación y calentamiento

Durante el proceso de secado el aire caliente se enfría y simultáneamente se va cargando de humedad. Su capacidad de secado va disminuyendo pero descartar este aire no sería económico y puede usarse nuevamente calentándolo y haciéndolo recircular a la cámara de secado.

El proceso de secado con recalentamiento del aire (figura 2.11) se desarrolla de la siguiente manera :

El aire precalentado del estado 1 al estado 2 es utilizado en el proceso de secado adiabático 2-3 durante el cual se incrementa su humedad y disminuye su temperatura

Este aire es nuevamente calentado según la trayectoria 3-4, manteniendo su contenido de humedad pero aumentando su temperatura y disminuyendo su humedad relativa.

Se utiliza nuevamente según la trayectoria 4-5 de secado adiabático y se repite la operación sucesivamente hasta que la humedad del aire es muy alta para poder ser usada en el secado.

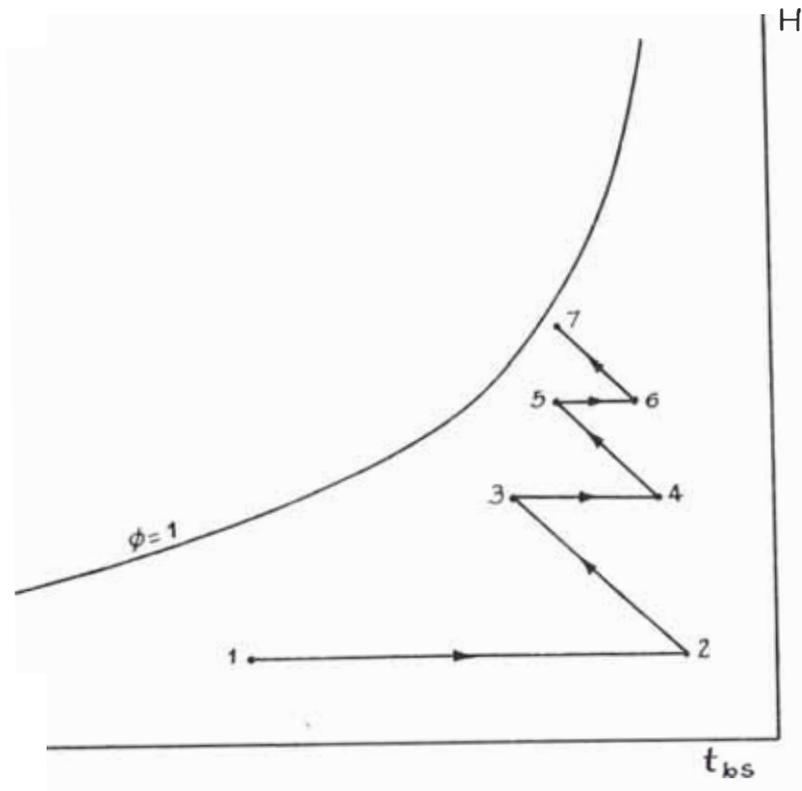


Figura 2.11 Proceso de precalentamiento, humidificación y calentamiento

## C A P I T U L O 3

### TEORIA DEL SECADO

#### 3.1 Secado

Definiremos el secado de alimentos como la extracción deliberada de una cierta cantidad del agua que estos contienen, por medios térmicos.

Aunque algunas veces se confunden las definiciones de secado y evaporación, debemos tener en cuenta que estas operaciones se diferencian en los aspectos más esenciales que son los aparatos, los métodos y los productos. En la evaporación el líquido se elimina por ebullición mientras que en el secado el líquido es arrastrado por el aire en forma de vapor a temperatura generalmente inferior a la de ebullición.

En la operación básica de secado intervienen dos factores importantes :

- a) Transmisión de calor para suministrar el calor latente de vaporización necesario.
- b) Movimiento del agua o vapor de agua a través del producto y su alejamiento del mismo.

El secado es uno de los métodos más antiguos para con-

servar alimentos, habiendo sido practicado por pueblos primitivos para secar carne y pescado al sol. En la actualidad es uno de los métodos más importantes para conservar productos alimenticios.

Los productos alimenticios secos se pueden almacenar por largos periodos de tiempo sin que pierdan sus propiedades nutricionales y organolépticas, ya que los microorganismos que causan la destrucción o deterioro de los alimentos no pueden crecer ni multiplicarse en ausencia de agua y muchos de los enzimas que provocan cambios indeseables en la composición química del alimento no pueden actuar sin agua.

El secado además de ser usado para la conservación de los alimentos es de gran utilidad en muchas industrias químicas y de transformación y puede aplicarse para :

- a) Facilitar el manejo posterior del producto.
- b) Permitir el empleo satisfactorio del mismo.
- c) Reducir el coste de embarque.
- d) Aumentar la capacidad de los aparatos.
- e) Preservar los productos durante el almacenamiento y transporte.
- f) Aumentar el valor o la utilidad de productos residuales.

Hay tres clases de proceso de secado :

- a) Secado por contacto con aire a presión atmosférica

El calor se transmite al producto por medio del aire

caliente o por superficies calientes, el vapor de agua es extraído con el aire.

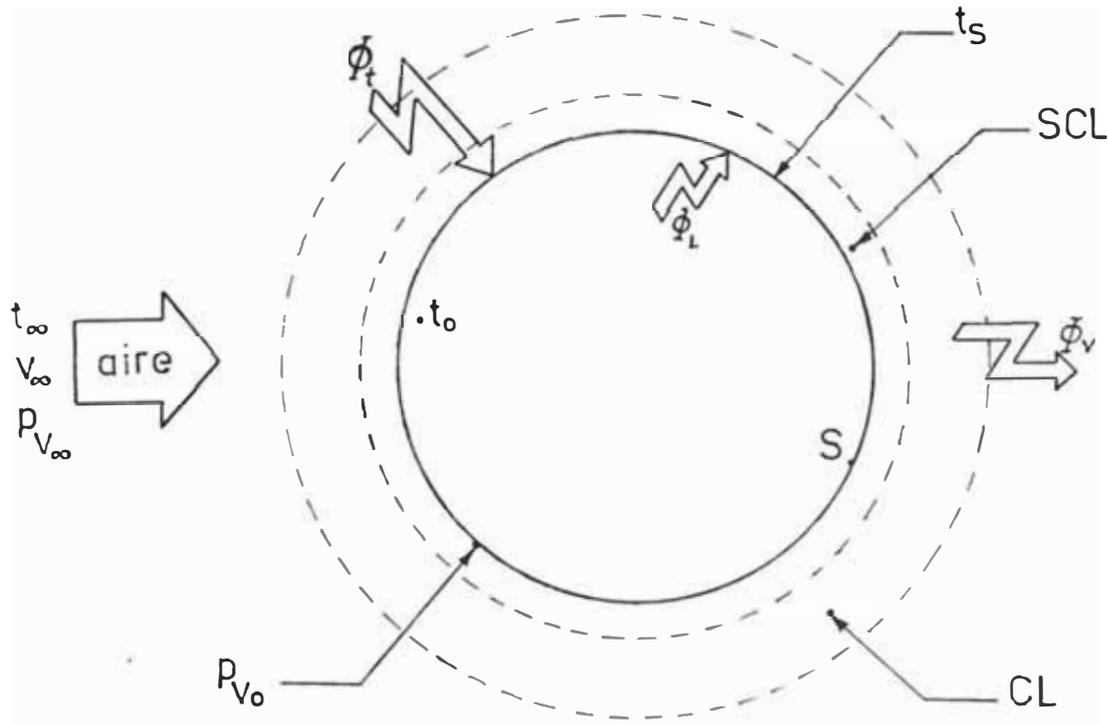
- b) Secado al vacío Se aprovecha el hecho de que la evaporación del agua tiene lugar más fácilmente a presiones reducidas. La transmisión de calor es casi siempre por conducción y raras veces por radiación.
- c) Secado por congelación o liofilización El vapor de agua se extrae por sublimación, la estructura de la sustancia alimenticia se conserva mejor, siendo necesario mantener en el secadero temperaturas y presiones adecuadas para asegurar que tendrá lugar la sublimación.

La teoría del secado está basada en principios de transferencia de calor, masa y momentum. Es un proceso continuo con cambios en el contenido de humedad, en la temperatura del aire y del producto y fenómenos de difusión de humedad todos ocurriendo simultáneamente. El flujo de humedad ocurre de los puntos de alta a baja presión de vapor y es aproximadamente proporcional a la diferencia de presión de vapor entre el producto y la atmósfera circundante.

### 3.1.1 Ley de la difusión

Sea un producto cualquiera que se desea secar, si colocamos éste dentro de un secador tendremos luego una superficie  $S$  del cuerpo (Figura 3.1) que estará rodeada de una capa delgada de aire prácticamente inmóvil (bajo la capa límite) aunque la velocidad del aire  $V_{\infty}$  dentro

del secador sea importante.



- S : superficie del cuerpo
- SCL : subcapa límite
- CL : capa límite
- $\phi_l$  : flujo de líquido
- $\phi_v$  : flujo de vapor
- $\phi_t$  : flujo de calor

Figura 3.1 Intercambio entre un cuerpo húmedo y el aire ambiente.

Esta capa (SCL) se mantiene a la temperatura  $t_o$  de la superficie del cuerpo húmedo y se satura de vapor de agua cuando empieza el proceso de secado. Para que el secado se pueda desarrollar, es necesario que en todo momento la tensión de vapor  $p_{v_o}$  dentro de la subcapa límite sea superior a la del aire ambiente  $p_{v_\infty}$ .

Habrà ahora difusión de vapor, de la superficie del cuerpo húmedo hacia la atmósfera. La subcapa límite es alimentada constantemente de moléculas de vapor de agua que pasan de la fase líquida a la gaseosa quitando calor

al cuerpo

Como vemos existe alrededor de la superficie S una doble difusión de agua :

- a) Difusión en estado líquido del interior hacia la superficie.
- b) Difusión en estado gaseoso de la superficie hacia el ambiente acompañado de una difusión de calor ya sea que venga del exterior (secado por convección, por radiación y por conducción) o del interior (secado por pérdidas dieléctricas).

3.1.2 Transferencia de calor, de vapor de agua y de cantidad de movimiento entre un cuerpo húmedo y el aire de secado

Los fenómenos de difusión de vapor y de calor, obedecen a leyes generales similares, la analogía entre estas y la fricción del aire en la superficie de un cuerpo húmedo es por la agitación de moléculas gaseosas. Esto se resume en la siguiente expresión general:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{transferencia} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{superficie de} \\ \text{intercambio} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{l} \text{coeficiente} \\ \text{de facilidad} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{l} \text{factor de po} \\ \text{tencialidad} \end{array} \right] \dots \dots \dots (3.1)$$

Arreglando esta expresión para tener velocidad de transferencia por superficie de intercambio tenemos :

$$\frac{\left[ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{transferencia} \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} \text{superficie de} \\ \text{intercambio} \end{array} \right]} = \left[ \begin{array}{l} \text{coeficiente} \\ \text{de facilidad} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{l} \text{factor de} \\ \text{potencialidad} \end{array} \right] \dots \dots \dots (3.2)$$

Tenemos ahora velocidad de transferencia por superficie de intercambio que viene a ser densidad de flujo, así pues la velocidad de transferencia estará representada por :

- a) Densidad de flujo de vapor ( $\Phi_v$ )
- b) Densidad de flujo de calor ( $\Phi_t$ ), a través de la superficie del cuerpo húmedo.
- c) Tensión ( $\tau$ ), ejercida por el fluido al moverse alrededor del cuerpo húmedo ( $\tau =$  fuerza de fricción  $F$  entre superficie de intercambio)

El coeficiente de facilidad estará representado por

- a) Difusividad térmica ( $\alpha_a$ ) o la conductividad térmica ( $K_a$ ) del aire de secado.
- b) Difusividad térmica ( $D_v$ ) del vapor de agua en el gas.
- c) Viscosidad cinemática ( $\nu_a$ ) o viscosidad dinámica ( $\mu_a = \rho_a \nu_a$ ) del aire.

Los coeficientes  $\alpha$ ,  $D_v$ ,  $\nu$  tienen dimensiones  $L^2 T^{-1}$  se expresan en  $m^2/s$  o  $m^2/h$ .

El factor de potencialidad estará representado por:

- a) El gradiente de temperatura  $dt/dz$ , expresando la variación de temperatura del aire en función de la distancia a la superficie o el gradiente de energía térmica  $d(\int c_p t)/dz$ .
- b) El gradiente de concentración de vapor  $d\beta_v/dz$ , o la tensión del vapor  $(dp_v/dz)(1/R_v t)$ .
- c) El gradiente de velocidad  $dv/dz$  o la cantidad

de movimiento  $d(fv)/dz$ .

La expresión general (3.1) la podemos escribir como:

a) Transferencia de calor - ley de Fourier

$$\dot{Q}_t = \alpha \frac{d}{dz} (\rho_a c_p t) = -K \frac{dt}{dz} \dots\dots\dots(3.3)$$

b) Transferencia de vapor - ley de Fick

$$\dot{Q}_v = - Dv \frac{df_v}{dz} = - \frac{Dv}{R_v \cdot t} \frac{dp_v}{dz} \dots\dots\dots(3.4)$$

c) Transferencia de cantidad de movimiento

$$\tau = \mu \frac{d}{dz} fV = \mu \frac{dV}{dz} \dots\dots\dots(3.5)$$

Tabla 3.1 Valores numéricos de las principales magnitudes características de las expresiones anteriores

Temp. aire (t) (°C)	Dens. aire (ρ) kg/m <sup>3</sup>	Calor especif. (c <sub>p</sub> ) kcal/kg°C	Conductiv. térmica (K <sub>a</sub> ) kcal/h.m.°C	Viscos. dinám. (μ) kg/m.h	Difusiv. del vapor (D <sub>v</sub> ) m <sup>2</sup> /h
0	1.293	0.241	0.0208	0.0610	0.083
20	1.205		0.0220	0.0640	0.092
40	1.130	0.242	0.0232	0.0665	0.105
60	1.060	0.243	0.0246	0.0700	0.115
80	1.010		0.0258	0.0735	0.125
100	0.950	0.244	0.0268	0.0770	0.136

### 3.2 Cuerpo húmedo

Cuerpo húmedo es aquel que se comporta como inerte a la presencia del agua líquida que lo acompaña, debido a que la tensión del vapor de agua es igual a la del agua líquida a la misma temperatura.

En un cuerpo húmedo la cantidad de agua que representa el exceso respecto a las condiciones de equilibrio entre el cuerpo y el medio ambiente, no está ligada por fuerzas mecánicas o fisicoquímicas y su evaporación será similar a la evaporación de agua en un recipiente.

### 3.3 Cuerpo higroscópico

Al contrario que un cuerpo húmedo, un cuerpo higroscópico modifica la tensión del vapor de agua que está encerrado en sus poros o entre sus partículas, debido a que la tensión de vapor es menor que la del agua líquida a la misma temperatura.

En este caso el agua está ligada al sólido por fuerzas mecánicas o fisicoquímicas y las leyes de evaporación serán diferentes que en el cuerpo húmedo.

### 3.4 Contenido de humedad del producto

Los productos húmedos están compuestos de materia seca y agua. La proporción de los componentes determina las características del proceso de secado y matemáticamente se expresa como el contenido de agua referido a la masa húmeda o a la materia seca.

#### 3.4.1 Contenido de humedad base húmeda (M)

Se define el contenido de humedad base húmeda del producto, como el cociente de la masa de vapor de agua

en el producto entre la masa de sustancia húmeda.

$$M = \frac{m_h - m_s}{m_h} \dots\dots\dots(3.6)$$

Donde : M : Contenido de humedad base húmeda;

kg agua/kg materia húmeda

$m_h$ : masa de la materia húmeda; kg

$m_s$ : masa de la sustancia seca; kg

### 3.4.2 Contenido de humedad base seca ( $X_p$ )

Como la cantidad de producto seco no se altera durante el proceso de secado, es muy útil conocer el contenido de humedad del producto referido al peso de sólido seco.

El contenido de humedad base seca se define como el cociente de la masa de vapor de agua en el producto entre la masa de sólido seco; (kg agua/kg sustancia seca)

$$X_p = \frac{m_h - m_s}{m_s} \dots\dots\dots(3.7)$$

Donde :  $X_p$  : contenido de humedad base seca del producto

$m_h$  : masa de la materia húmeda; kg

$m_s$  : masa de la sustancia seca; kg

De las ecuaciones 3.6 y 3.7 deduce la relación entre

$X_p$  y M

$$X_p = \frac{M}{1 - M} \dots\dots\dots(3.8)$$

El producto húmedo contiene una cierta cantidad de agua antes de iniciar el proceso de secado y se le conoce como contenido de humedad inicial ( $M_i$  o  $X_{p i}$ ). Se obtiene a partir de las ecuaciones 3.6 ó 3.7, reemplazando el valor de  $m_{h i}$  (masa de la materia húmeda antes de iniciar el secado).

Después de secado el producto aún contiene una pequeña cantidad de agua y se le conoce como contenido de humedad final ( $M_f$  o  $X_{p f}$ ). Se obtiene de las ecuaciones 3.6 ó 3.7, reemplazando el valor de la masa de la materia húmeda, después del secado  $m_{h f}$ .

### 3.5 Contenido de humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ )

Al entrar en contacto el aire de secado con el cuerpo húmedo puede ocurrir que la presión de vapor de agua en el producto sea mayor que la presión de vapor en el aire y entonces se produciría pérdida de agua del cuerpo húmedo y por consiguiente su secado. En caso contrario, en que la presión de vapor de agua en el aire sea mayor que la presión de vapor de agua en el producto ocurrirá condensación del vapor de agua del aire y el producto captará más humedad.

Cuando las presiones de vapor de agua del producto y del aire sean iguales se tendrá una situación de equilibrio y al contenido de humedad del producto se le llama contenid

do de humedad de equilibrio. Ver figura 3.2.

### 3.6 Isotermas de sorción o curvas de equilibrio

Son curvas en las cuales se tiene como abscisas el contenido de humedad del producto y como ordenadas la humedad relativa del aire circundante. En ellas se grafica el contenido de humedad del producto equilibrado con la humedad del aire para una temperatura dada constante.

Las curvas de equilibrio son diferentes para cada producto y aun cuando se trate de un mismo material se tendrá distintas curvas para diferentes temperaturas, (pues la humedad de equilibrio disminuye al aumentar la temperatura). Por tanto, para tener una buena información sobre las condiciones de secado de un material se deben determinar las curvas de equilibrio a varias temperaturas.

Con la curva de equilibrio se puede saber cual será la variación de la humedad del cuerpo; así si se tiene que el punto representativo del contenido de humedad del cuerpo y la humedad relativa del aire circundante se encuentra a la derecha de la curva, punto 1 en la figura 3.2, el cuerpo perderá humedad hasta lograr el contenido de humedad de equilibrio con el aire  $M^*$  y se dice que ha alcanzado el contenido de humedad de equilibrio de desorción.

En caso de que el punto esté situado a la izquierda de la curva, (material relativamente seco), el cuerpo cap-

tará humedad hasta lograr el equilibrio con el aire circundante en  $M^*$  y se dice que ha alcanzado el contenido de humedad de equilibrio de absorción.

Puede haber diferencias significativas para ciertas humedades relativas y temperaturas entre los valores del contenido de humedad de equilibrio de desorción y absorción. Los contenidos de humedad por desorción son por lo general más altos que los valores de absorción.

La diferencia entre las isoterms de desorción y absorción es llamado el efecto de histéresis.

Debido a que el proyecto está enfocado en la desorción más que en la absorción es que en lo que respecta a nuestros resultados las isoterms de equilibrio se referirán específicamente a las curvas de desorción.

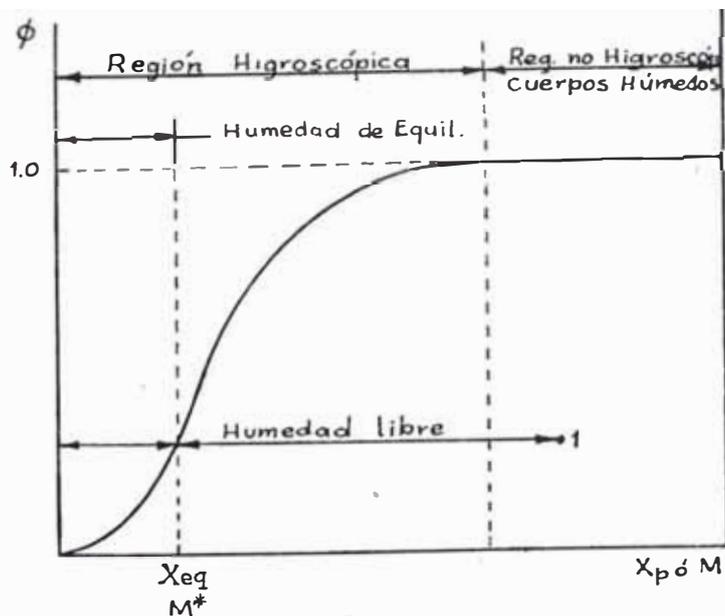


Figura 3.2 Curva de equilibrio

### 3.7 Velocidad de secado (W)

La velocidad de secado de un producto se define como la pérdida de humedad en la unidad de tiempo. Refiriendo la velocidad de secado a la unidad de área de secado se tiene:

$$W = \frac{S}{A} \left( - \frac{dX_p}{d\Theta} \right) \dots\dots\dots(3.9)$$

Para el periodo de velocidad de secado constante, esta ecuación la podemos expresar de la siguiente manera :

$$W_c = \frac{10^3 (X_{p,i} - X_{p,c}) S}{A \Theta_c} \dots\dots\dots(3.10)$$

En la cual :

- $W_c$  : velocidad constante de secado; gr agua/s.m<sup>2</sup>
- $X_{p,i}$  : contenido de humedad inicial; kg agua/kg sólido seco
- $X_{p,c}$  : contenido de humedad crítico; kg agua/kg sólido seco
- $A$  : área de la superficie de secado; m<sup>2</sup>
- $\Theta_c$  : tiempo de secado para el periodo de velocidad de secado constante; s
- $S$  : peso del sólido seco; kg

La rapidez de secado de un producto depende de las propiedades del aire de secado, naturaleza del producto y diseño del secador.

Durante el secado de un producto se tiene que separar tanto la humedad existente sobre la superficie del cuerpo

como la del interior del mismo. En la figura 3.3 podemos apreciar como la humedad va disminuyendo desde el valor inicial (punto A) hasta el límite con  $M^*$  (contenido de humedad de equilibrio). Entre estos puntos existen tramos de secado diferentes entre sí, de los cuales dos son los periodos más importantes :

- a) Periodo de velocidad de secado constante o periodo antecrítico.
- b) Periodo de velocidad de secado decreciente o periodo postcrítico.

El primero corresponde a la evaporación del agua superficial y el segundo a la evaporación del agua interior del cuerpo.

Al punto de cambio de velocidad de secado constante a velocidad decreciente se le conoce como contenido crítico de humedad.

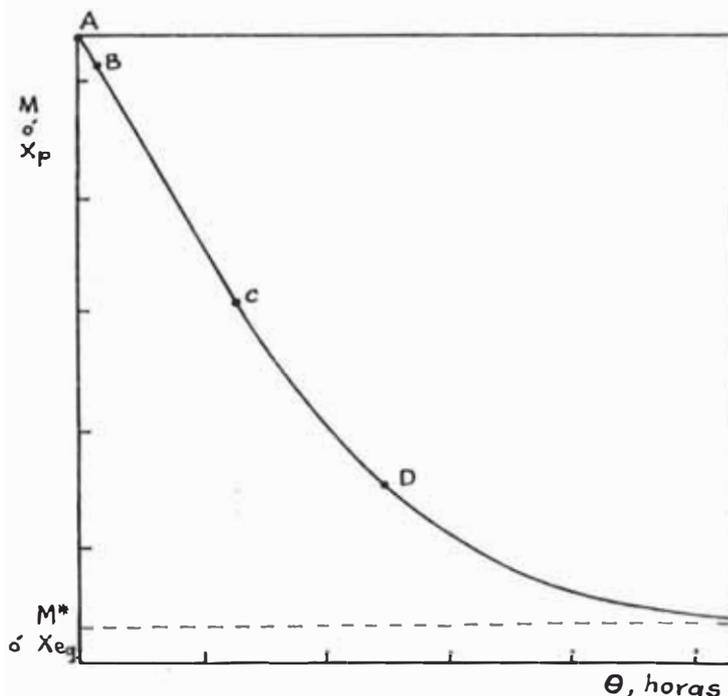


Figura 3.3 Curva de variación de peso con el tiempo

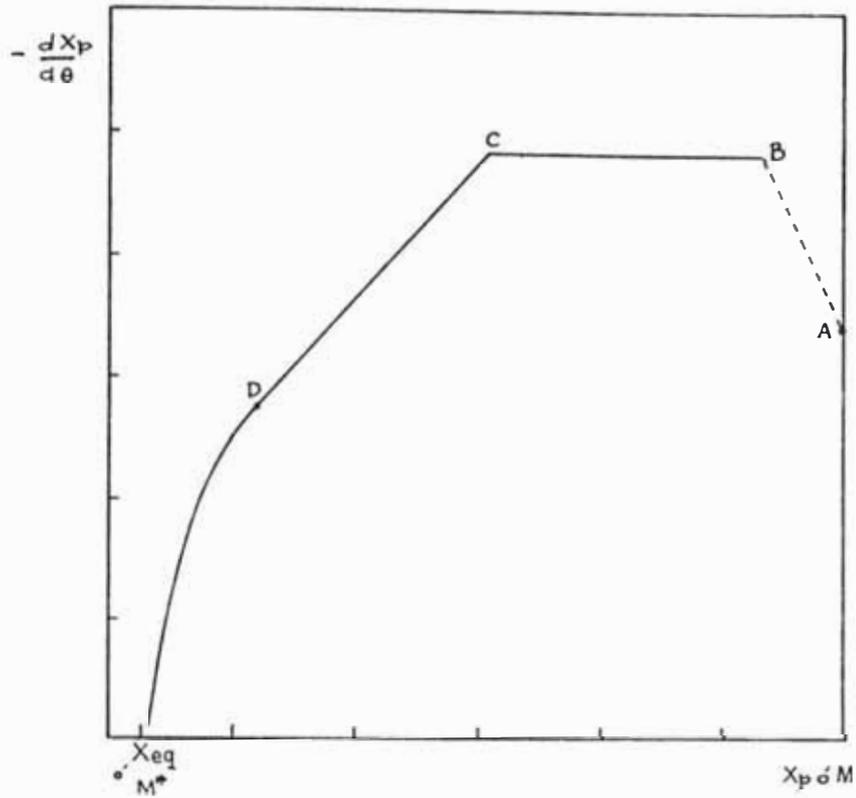


Figura 3.4 Curva de velocidad de secado

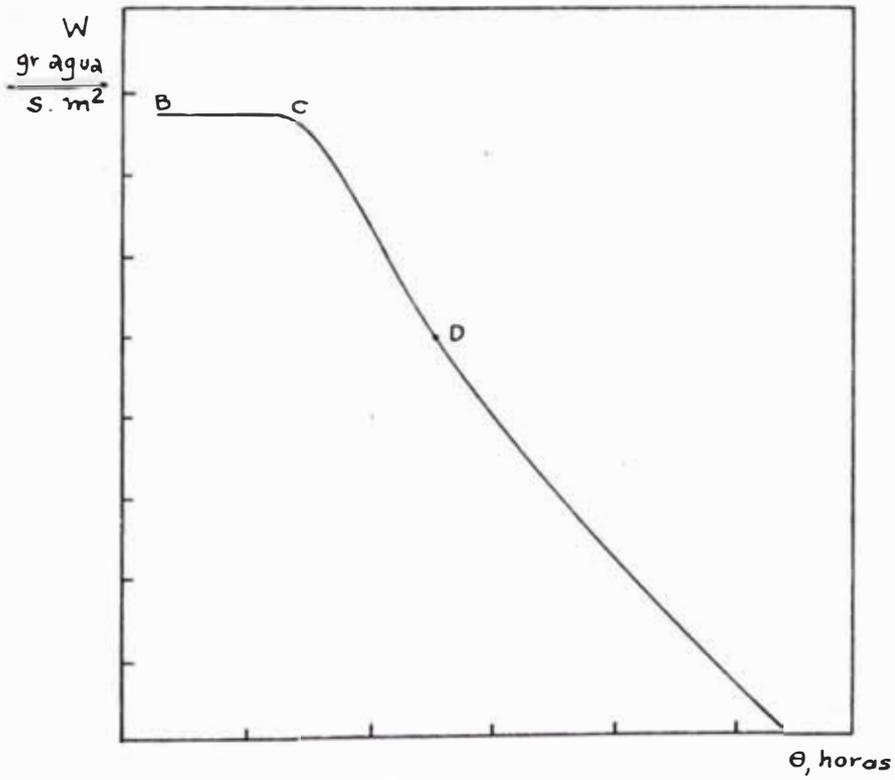


Figura 3.5 Curva de velocidad de secado - tiempo

### 3.8 Duración del secado en condiciones constantes ( $\theta$ )

La duración del secado se deduce sencillamente una vez evaluada la velocidad de secado. Separando variables en la ecuación 3.9 e integrando entre los límites  $X_{p,i}$  y  $X_{p,f}$  se tiene :

$$\theta = \frac{S}{A} \int_{X_{p,f}}^{X_{p,i}} \frac{1}{W} dX_p \dots\dots\dots(3.11)$$

Para el cálculo de la integral del segundo miembro se debe considerar el periodo antecrítico y postcrítico.

#### 3.8.1 Duración del secado - periodo antecrítico ( $\theta_a$ )

En este periodo la velocidad de secado es constante ( $W_c$ ), por tanto la ecuación 3.11 se transforma en :

$$\theta_a = \frac{S (X_{p,1} - X_{p,2})}{A W_c} \dots\dots\dots(3.12)$$

#### 3.8.2 Duración del secado - periodo postcrítico ( $\theta_p$ )

En el caso general no se conoce una relación sencilla entre  $W$  y  $X_p$ , sin embargo en muchos casos es posible hallar una relación aproximada entre estos parámetros. Cuando la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, como en el primer periodo postcrítico de la figura 3.4, integrando la ecuación 3.11 obtenemos:

$$\theta_p = \frac{S (X_{p,1} - X_{p,2})}{A (W_1 - W_2)} \ln \frac{W_1}{W_2} \quad (3.13)$$

Conociendo la humedad crítica  $X_{p,c}$ , humedad de equilibrio  $X_{eq}$  y la velocidad de secado en el periodo antecrítico  $W_c$ , se puede evaluar la duración del secado postcrítico, aunque solo sea de un modo aproximado, si suponemos que la variación de la velocidad es lineal hasta la conclusión del secado, (ver figura 3.4).

Bajo esta suposición, la velocidad para la humedad  $X_p$  será  $W = W_c (X_p - X_{eq}) / (X_{p,c} - X_{eq})$ ; donde:  $X_{p,c}$ ,  $X_{eq}$  y  $W_c$  son constantes. Reemplazando en la ecuación 3.11 e integrando obtenemos :

$$\theta_p = \frac{S (X_{p,c} - X_{eq})}{A W_c} \ln \frac{X_{p,1} - X_{eq}}{X_{p,2} - X_{eq}} \dots\dots(3.14)$$

## C A P I T U L O 4

### DESCRIPCION DEL BANCO EXPERIMENTAL DE SECADO

#### 4.1 Introducción

Al plantearse la construcción del banco experimental se empieza por establecer la forma que éste tendrá.

Partiendo del requerimiento de que en el banco se deben lograr humedades del aire constantes y menores a las del medio ambiente es que se adopta un sistema de circulación cerrada o sin renovación de aire. Al asumir esto también se quiere lograr la hermeticidad del conjunto, de tal manera que no ingrese aire húmedo ambiental por algo muy importante para los requerimientos de ensayo : el poder establecer una temperatura constante del aire de secado.

El cuerpo principal del equipo ha de consistir en un ducto en el cual se debe ubicar la cámara de secado y demás componentes, a excepción del elemento impulsor del aire (ventilador). La sección elegida para el ducto principal es la rectangular. El aire que circule por el ducto principal debe pasar a través del producto para luego hacerlo por un elemento deshumidificador y volver a circular por todo el

sistema.

Se plantean dos alternativas de construcción del banco experimental, instalación del ducto principal en posición horizontal e instalación del ducto en posición vertical. De estas dos alternativas, la que ofrece mayores ventajas en cuanto a espacio libre para la colocación de instrumentos es la de posición vertical y es la que finalmente se adopta, pues con la instalación en posición horizontal se tendría que aumentar la longitud del ducto para conseguir mayor espacio para los instrumentos. En las figuras 4.1 y 4.2 se puede apreciar las alternativas de construcción.

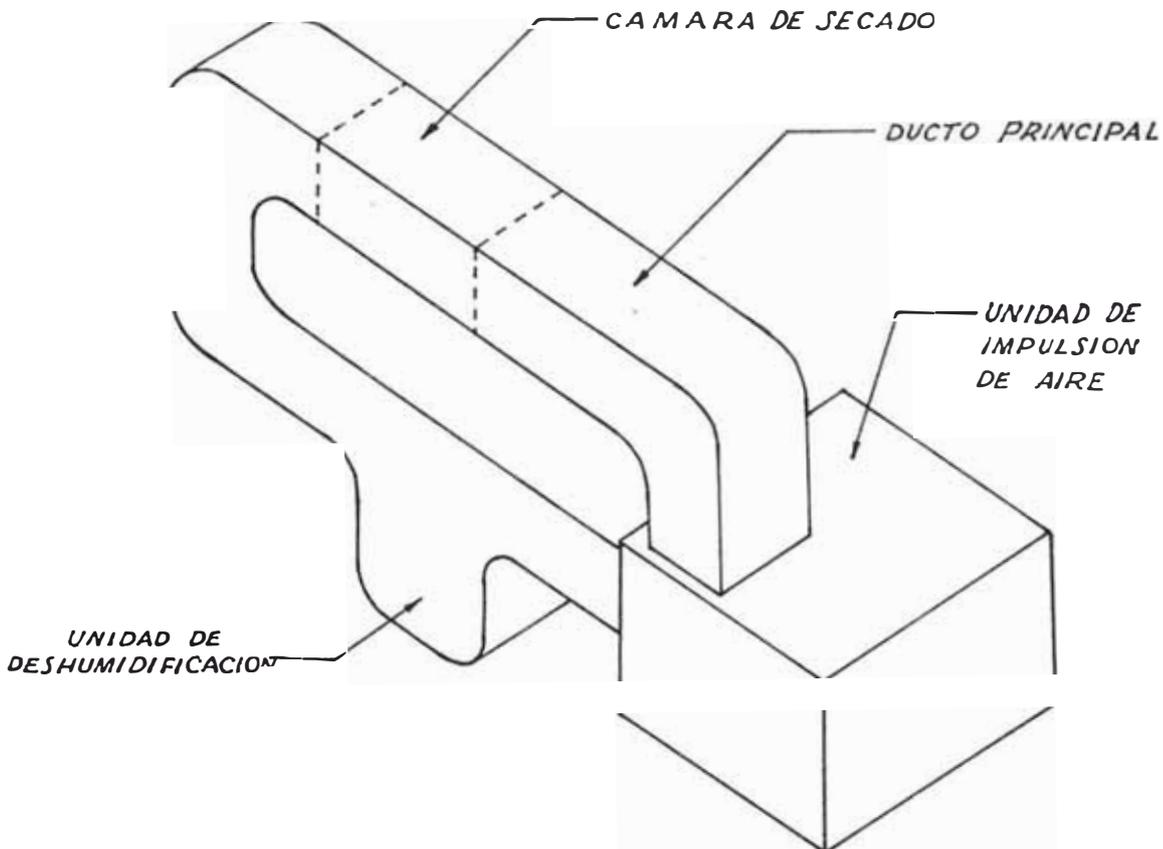


Figura 4.1 Banco experimental de secado - posición vertical del cuerpo principal.

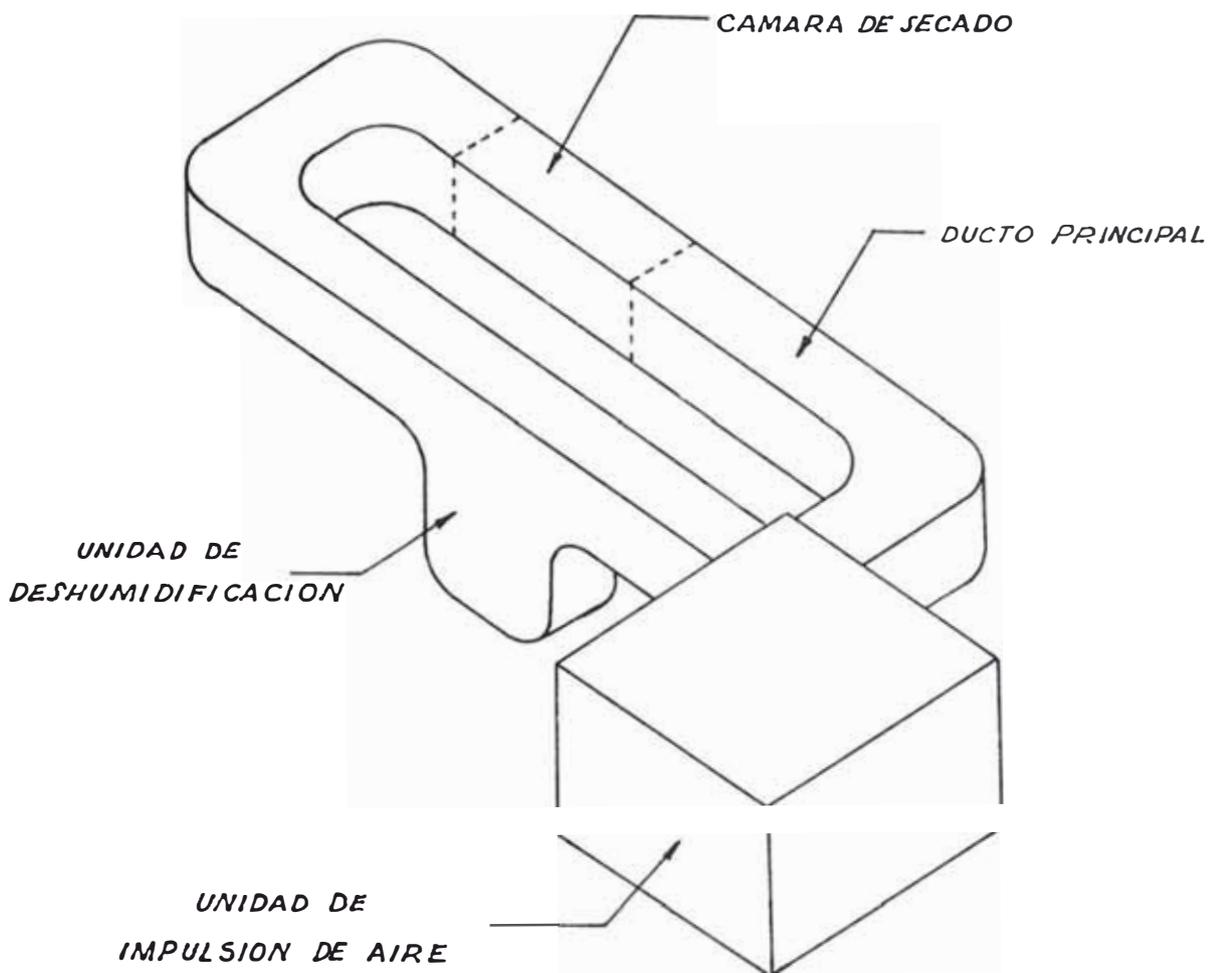


Figura 4.2 Banco experimental de secado - posición horizontal del ducto principal.

#### 4.2 Componentes del banco experimental - su descripción

El banco experimental de secado estará constituido de una serie de componentes, los cuales nos permitirán gobernar los parámetros principales del aire de secado.

Durante el ensayo de secado, en el equipo se deben desarrollar cuatro pasos fundamentales y en el siguiente orden :

- 1) Impulsión del aire
- 2) Calentamiento del aire

- 3) Utilización del aire en el secado (humidificación)
- 4) Deshumidificación del aire, para hacerlo circular nuevamente (recirculación).

Para impulsar el aire se requiere del uso de un ventilador, para el calentamiento del aire una resistencia eléctrica, una bandeja o canastilla para soportar el producto húmedo y un deshumedecedor para extraerle agua al aire proveniente de la cámara de secado.

Aparte de los ya mencionados existen otros dos componentes, tan importantes como los primeros pero que sus funciones no están enunciadas dentro de los cuatro pasos fundamentales que tienen que desarrollarse en el equipo. Estos son : un radiador el cual estará ubicado antes de la cámara de secado y un control automático (electrónico) para encender o apagar el deshumedecedor según la humedad del aire sea mayor o menor a la requerida.

#### 4.2.1 Función de cada componente

Cada uno de los componentes del equipo de ensayo cumple una función específica dentro de todo el conjunto.

A continuación se describen cada uno de ellos siguiendo el orden del paso del aire desde que sale del ventilador.

#### 4.2.1.1 Cuerpo principal del equipo de ensayo

Constituye el elemento representativo de la unidad porque en el van a estar contenidos todos los componentes del equipo. Desde ese punto de vista, la caja de succión que contiene al ventilador, conjuntamente con el ducto rectangular, forman el cuerpo principal. (Ver figura 4.1).

En el interior del ducto se van a instalar una resistencia eléctrica y un radiador para elevar o disminuir la temperatura del aire según cual sea el requerimiento, una canastilla para sostener la materia a secar que estará ubicada en la cámara de secado y el deshumecedor que se ubicará entre la salida del aire de la cámara de secado y la entrada a la cámara o caja de succión.

Como podemos apreciar, el aire que va a circular por el interior del ducto principal va a pasar por todos los componentes del equipo.

#### 4.2.1.2 Ventilador

La función del ventilador dentro del banco experimental es la de proporcionar la energía necesaria al aire de secado para que pueda circular a lo largo de todo el equipo de ensayo. El ventilador será accionado por un motor eléctrico y ambos estarán ubicados dentro de una cámara o caja de succión la que a su

vez formará un solo conjunto con el ducto principal.

El aire de secado durante su circulación en el equipo experimental, además de vencer las pérdidas de presión originadas por la fricción con las paredes del ducto, por los cambios de dirección y sección del ducto y por su paso a través del producto a secar y otros accesorios, debe tener la energía suficiente para alcanzar velocidades de por lo menos 1 m/s, de manera que ésta pueda ser regulada según los requerimientos de ensayo.

#### 4.2.1.3 Resistencia eléctrica

Las operaciones de secado convencional se realizan con aire caliente cuya temperatura depende del producto a secar. Para incrementar la temperatura del aire en estos secadores, se utiliza la energía eléctrica y/o la energía proveniente de la combustión de la leña o de derivados del petróleo.

En el banco experimental se utilizará una resistencia eléctrica para el calentamiento del aire debido a la reducida capacidad del secador y principalmente por la facilidad que esta ofrece para el control de la temperatura. El calor disipado por la resistencia eléctrica depende directamente del voltaje y este será controlado en el equipo por medio de un reóstato.

#### 4.2.1.4 Radiador

Este elemento se incorporó después de haber construido y probado el equipo.

Al realizar las pruebas preliminares se observó que haciendo funcionar solo el ventilador, el aire de secado incrementaba su temperatura hasta 39.3 °C (ver tabla a.1, capítulo 6), lo cual es deseable en ciertos casos en que el secado se requiera hacer a temperaturas por encima de los 40 °C. Como en el banco experimental también se deben lograr temperaturas inferiores a ésta, es que se decidió instalar el radiador.

El radiador entonces, tiene la función de enfriar el aire que se ha calentado por la disipación de calor del motor eléctrico y no se usará (no se hará circular agua en él) cuando se desee calentar el aire de secado con la resistencia eléctrica.

#### 4.2.1.5 Cámara de secado

A diferencia de los otros componentes, la cámara de secado no es un elemento independiente del cuerpo principal del equipo pues en realidad viene a ser una porción del ducto principal. Sin embargo se le trata como un componente más dada la importancia que tiene dentro del conjunto y debido a que en esta porción de ducto se van a colocar los productos a secar y por

consiguiente aquí debe llegar el aire de secado con la temperatura, humedad y velocidad requeridas para el ensayo.

#### 4.2.1.6 Elemento de soporte del material a secar

Es un elemento de construcción simple en el cual se van a colocar los materiales húmedos que se requieran secar.

Estará colocado convenientemente en la cámara de secado de tal manera que el aire pase a través de él y de los materiales que se están secando.

Se usará dos tipos de elemento de soporte, uno en forma de bandeja y otro en forma de un paralelepípedo. Con este último se evaluará la pérdida de presión del aire al atravesar un lecho de granos.

#### 4.2.1.7 Malla metálica de retención de material

Esta malla estará ubicada inmediatamente después de la cámara de secado y su función es la de retener a los materiales que accidentalmente puedan caer del elemento que los soporta y evitar que sean arrastrados por el aire a lo largo del ducto.

#### 4.2.1.8 Deshumecedor

El banco experimental de secado está formado por

un sistema de ductos que forman un circuito cerrado de flujo de aire. El aire de secado que circula en el sistema, al pasar a través del producto húmedo, arrastra el agua superficial del mismo cargándose de humedad.

La finalidad del deshumecedor es captar (por condensación) el vapor de agua con el que se ha cargado el aire de secado, consiguiendo de esta manera que pueda ser nuevamente utilizado.

El deshumecedor debe estar colocado después de la cámara de secado y antes del ventilador.

#### 4.2.1.9 Compuerta reguladora del flujo de aire

La función de este elemento es la de controlar la velocidad del flujo de aire que debe circular en la cámara de secado.

Estará instalado en el ducto principal y según estrangule o deje libre el paso del aire, se tendrá una menor o mayor velocidad del mismo.

#### 4.2.1.10 Control automático electrónico de accionamiento del deshumecedor

La construcción de este control obedece al requerimiento de mantener la humedad relativa del aire en un valor constante durante los ensayos de secado.

La función del control es encender o apagar auto máticamente el deshumecedor, según la humedad relativa del aire sea superior o inferior al valor fijado para el ensayo.

#### 4.2.2 Instrumentación

Después de haber visto los componentes del equipo y la función que cumplen cada uno de ellos, trataremos ahora de la instrumentación utilizada en los ensayos.

Los instrumentos pueden considerarse de cierto modo como componentes del equipo por lo imprescindibles que resultan en la ejecución de los ensayos de secado.

El tipo de instrumento más apropiado para el secado solar se puede localizar dentro de los siguientes cuatro grupos de equipos .

##### a) Equipos meteorológicos

Con el uso de estos equipos, el objetivo central es recolectar una serie de datos que proporcionen una base estadística para una aplicación futura y el diseño de sistemas solares en general. Los datos que se deben medir son :

- a. La radiación solar
- b. La temperatura ambiente
- c. La humedad relativa
- d. La velocidad y dirección del viento

e. La precipitación

b) Equipos de análisis del proceso de secado solar

Con ellos se trata típicamente las mediciones cortas, por ejemplo, la evaluación de la eficiencia de un colector solar. Los datos a medir son :

- a. La temperatura del aire en la entrada al colector ( $T_1$ )
- b. La temperatura del aire en la entrada a la cámara de secado ( $T_2$ )
- c. La temperatura del aire en la salida a la cámara de secado ( $T_3$ )
- d. El flujo de aire a través del colector ( $\dot{m}_a$ )
- e. La humedad relativa del aire en la salida a la cámara de secado ( $\phi$ )

c) Equipos para caracterizar físicamente el producto a secar

Con éstos equipos se obtienen las medidas que están dirigidas a cuantificar el comportamiento del producto bajo ciertas condiciones de secado, resumiéndose en :

- a. Curvas de secado
- b. Curvas de equilibrio

d) Equipos para realizar el procesamiento de los datos y optimización del sistema

Mediante éstos equipos se desea efectuar un amplio rango de cálculos, variar y controlar eventualmente de manera sistemática algunos parámetros, por ejemplo, las diferencias de temperatura o el flujo de aire. Estos equipos son :

- a. Registrador de datos, mecánico o electrónico (SAD)
- b. Minicomputadora

Todo el sistema de instrumentación para el secado solar se muestra en la figura 4.3

En nuestro caso específico, para los ensayos en el banco experimental de secado, los instrumentos requeridos son principalmente los de medición de humedad relativa, temperatura y velocidad del aire de secado.

Para el control de la temperatura del aire se ha de usar un reóstato, un manómetro inclinado para medir la caída de presión y eventualmente un microvoltímetro digital. A continuación detallamos las características de cada uno de los instrumentos que van a emplearse en los ensayos.

1. Sensor de humedad y temperatura

marca : Higrotest

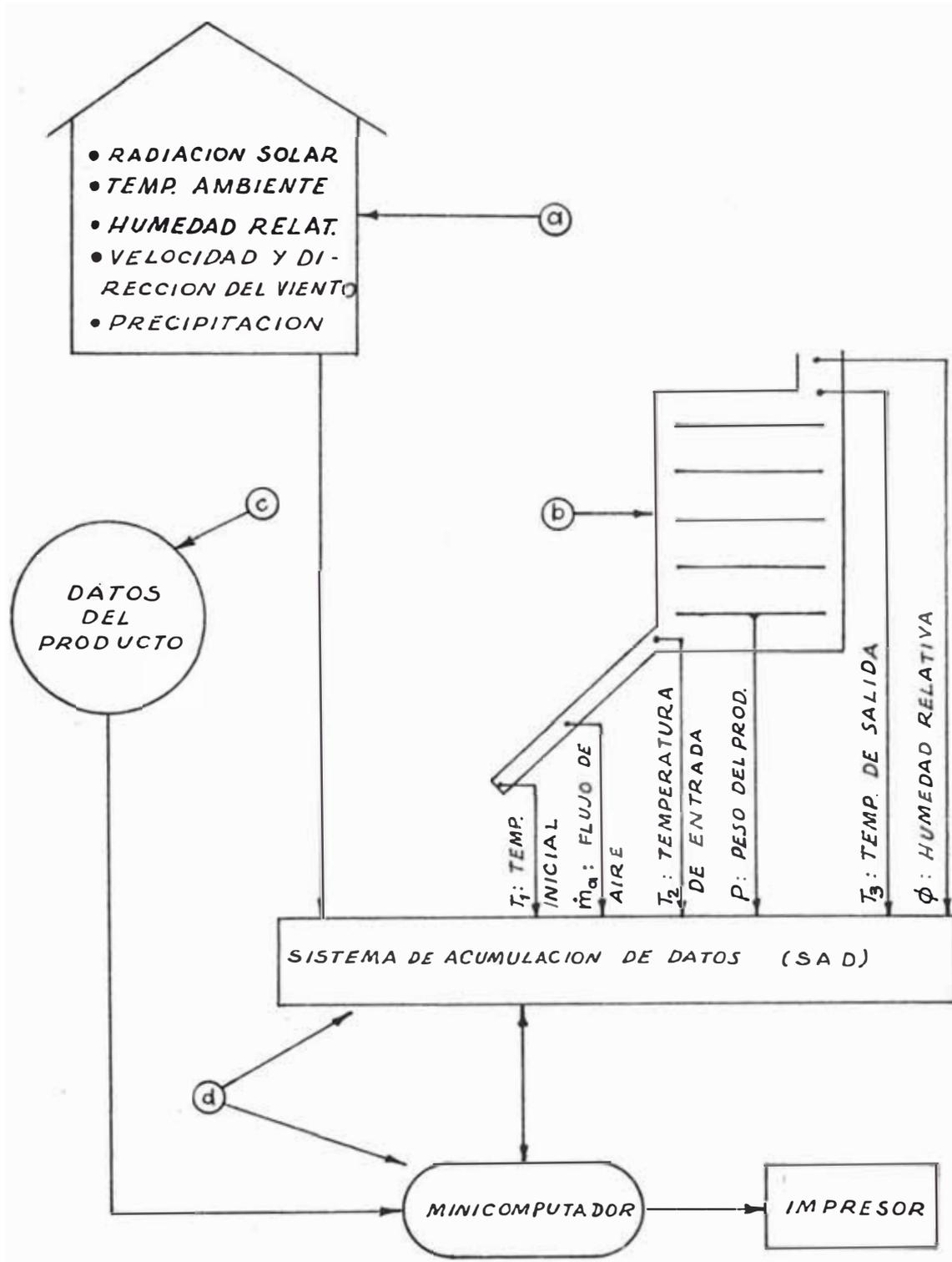


Figura 4.3 Instrumentación utilizada en el secado solar

modelo : Testo 6400  
fabricación : West Germany  
rango :  $\emptyset$  : 0 - 100 %  
          T : -199.9 - +199.9 °C  
aproximación :  $\emptyset$  : 0.1 %  
                  T : 0.1 °C

2. Sensor digital de velocidad y temperatura

marca : Therm  
modelo : 2253 - 1  
fabricación : West Germany  
rango : V : 0.3 - 20 m/s  
          T : -70 - +199.9 °C  
              +200 - +1200 °C  
aproximación : V : 0.1 m/s  
                  T : 0.1 °C

3. Anemómetro para flujos pequeños

marca : Airflow Lufttechnik GmbH  
modelo : TA 400  
fabricación : West Germany  
rango : 0 - 2 m/s  
aproximación : 0.02 m/s (0 - 1 m/s)  
                  0.1 m/s (1 - 2 m/s)

4. Higrómetro de pelo

marca : Haar Hygrometer  
fabricación : West Germany



## 8. Manómetro inclinado

marca : Dwyer

modelo : N<sup>o</sup> 400

fabricación : U.S.A.

rango : 0 a 10 pulg.c.a.

aproximación : 0.01 pulg.c.a.

## 9. Impresor puntual multicanal

marca : Linseis

modelo : L - 12

fabricación : U.S.A

rango : 1 - 500 mV (dividido en nueve rangos)

1 - 200 V (dividido en ocho rangos)

### 4.3 Funcionamiento del banco experimental

En la descripción de los componentes del equipo, se ha ce mención que el radiador y la resistencia eléctrica no de ben funcionar simultáneamente, dado que las funciones que cumplen dentro del mismo son opuestas.

Así pues, cuando se desee tener en el equipo aire de secado caliente, la resistencia eléctrica debe estar encen- dida y no debe circular agua en el radiador. En el caso con- trario, cuando se desee tener aire de secado frío (entiénda se por aire frío, como aire aproximadamente a la temperatu- ra ambiente), la resistencia debe estar apagada y debe cir- cular agua en el radiador.

Podemos, entonces, diferenciar dos maneras de funcionar del equipo :

1. Funcionamiento del banco experimental para ensayos con aire caliente.
2. Funcionamiento del banco experimental para ensayos con aire frío.

Para una mejor descripción del funcionamiento del equipo, se muestra a continuación su esquema, señalando sus componentes.

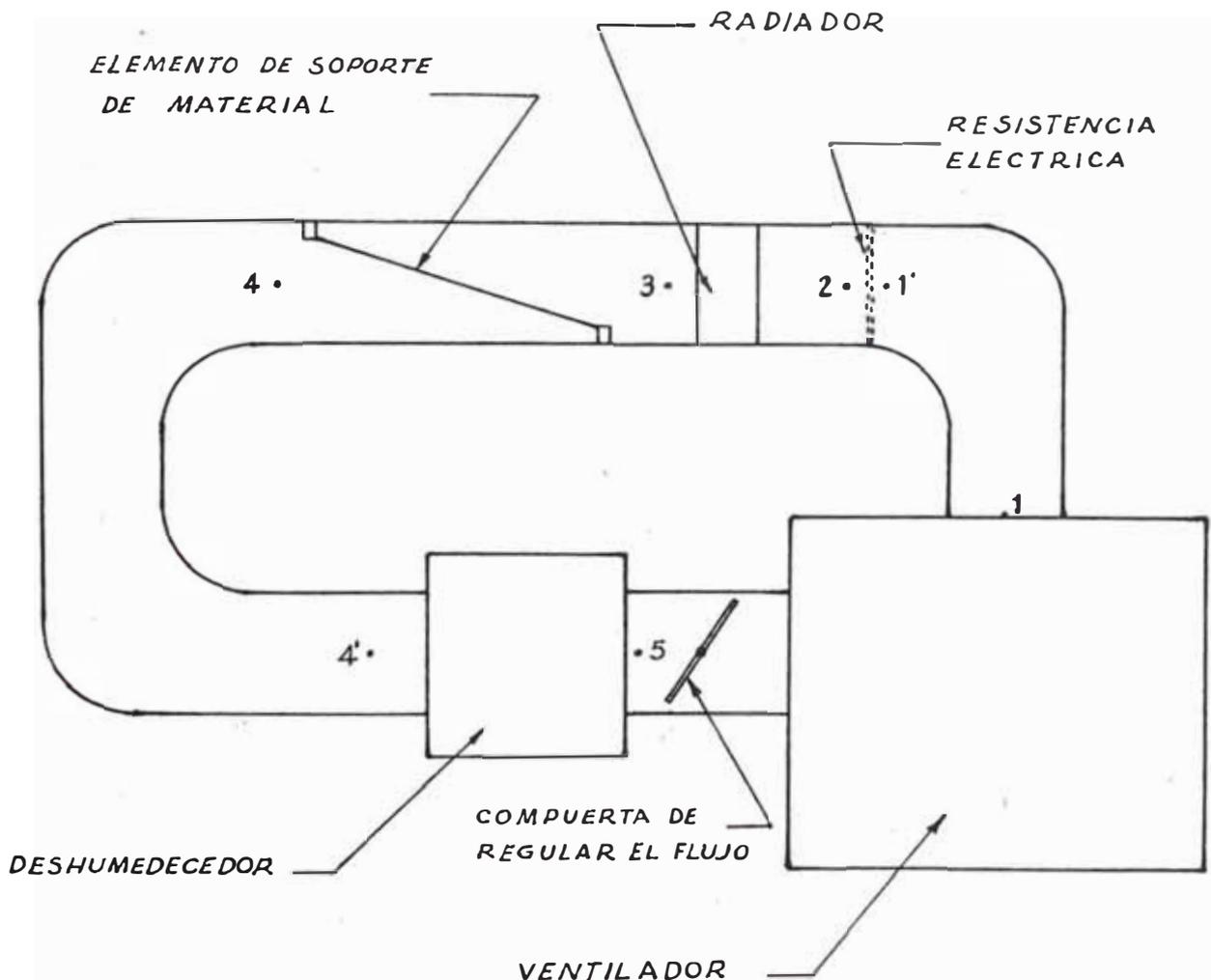


Figura 4.4 Esquema del banco experimental

#### 4.3.1 Funcionamiento del equipo para ensayos con aire caliente

Supongamos que se desea realizar un ensayo de secado con aire a las siguientes condiciones :

Temperatura :  $T_3 > T_{amb.}$

Humedad relativa :  $\phi_3$

Velocidad :  $V_3$

Para lograr estas condiciones, se empezará por hacer funcionar el ventilador y con la ayuda de la compuerta de regulación de flujo, regular la velocidad del aire hasta conseguir la velocidad deseada  $V_3$ . A continuación se enciende la resistencia eléctrica, regulando el voltaje con el reóstato hasta lograr la temperatura requerida del aire  $T_3$ . La humedad relativa  $\phi_3$ , se obtiene regulando convenientemente el control electrónico de accionamiento del deshumecedor.

El aire, desde que sale impulsado por el ventilador hasta que vuelve al mismo para circular nuevamente, sufre cambios en sus parámetros al pasar por los distintos componentes del equipo.

Cuando recién se inicia el funcionamiento del equipo, los parámetros del aire a la salida del ventilador (punto 1 en la figura 4.4), son  $T_1$ ,  $\phi_1$ ,  $V_1$ . Al pasar por la resistencia eléctrica, que se encuentra encendida, se

produce un calentamiento sensible (sin variación del contenido de humedad del aire), aumentando su temperatura a  $T_2$  y disminuyendo su humedad relativa a  $\phi_2$ . Luego, al pasar a través del radiador, cuya superficie en ese momento se encuentra a una temperatura menor que  $T_2$ , la temperatura del aire disminuye a  $T_3$  y la humedad relativa aumenta a  $\phi_3$ . En estas condiciones, el aire pasa a través de la cámara de secado en donde se encuentran los productos húmedos y arrastra consigo el agua (en forma de vapor) de la superficie de éstos y como consecuencia su temperatura disminuye a  $T_4$  y su humedad relativa aumenta a  $\phi_4$ . Finalmente, pasa por el deshumedecedor, en cuyo serpentín evaporador se condensa el vapor de agua captado en la cámara de secado, quedando nuevamente en condiciones de ser impulsado por el ventilador para continuar con el proceso de secado. La velocidad del aire se ha considerado constante desde que sale del ventilador hasta que llega al producto húmedo (cámara de secado).

Estos procesos se van repitiendo continuamente hasta que la superficie del radiador alcance la temperatura del aire de secado en el punto 2 y entonces ya no exista esa variación de humedad relativa y temperatura entre los puntos 2 y 3.

En consecuencia, podemos resumir que después de un cierto tiempo de funcionamiento del equipo se van a producir los siguientes procesos :

- 1' - 2 : Calentamiento sensible
  - aumenta temperatura
  - disminuye humedad relativa
- 2 - 3 : Los parámetros permanecen constantes
- 3 - 4 : Proceso de secado
  - disminuye temperatura
  - aumenta humedad relativa
- 4' - 5 : Deshumidificación
  - disminuye temperatura
  - disminuye el contenido de humedad

#### 4.3.2 Funcionamiento del equipo para ensayos con aire frío

En ciertas ocasiones se va a requerir hacer ensayos con aire de secado a temperatura ambiente, supongamos que las condiciones requeridas son :

Temperatura  $\approx T_{amb.}$

Humedad relativa :  $\phi_3$

Velocidad :  $V_3$

La velocidad y la humedad relativa del aire requeridas en estos ensayos, se logran de la misma manera que en el caso anterior. Como la temperatura en estos ensayos es aproximadamente igual a la temperatura ambiente, no se usará la resistencia eléctrica.

Después de un cierto tiempo de funcionamiento del equipo, el calor disipado por el motor que acciona al ventilador hace que la temperatura del aire se incremen-

te, entonces, los cambios de los parámetros del aire durante su recorrido son :

En el punto 1 (figura 4.4), tiene la temperatura  $T_1$  y humedad relativa  $\phi_1$ ; al pasar por la resistencia eléctrica, que se encuentra apagada, su temperatura y humedad relativa no varían; luego, al pasar a través del radiador su temperatura disminuye al valor  $T_3$  y su humedad relativa aumenta a  $\phi_3$ . Después, pasa a través de los productos húmedos de la cámara de secado arrastrando el agua superficial de éstos y como consecuencia su temperatura disminuye y su humedad relativa aumenta. Finalmente el aire ingresa a la unidad de deshumidificación donde es acondicionado nuevamente para ser impulsado por el ventilador.

El resumen de los procesos vistos en este caso es :

- 1° - 2 : Los parámetros permanecen constantes
- 2 - 3 : Enfriamiento sensible
  - disminuye temperatura
  - aumenta humedad relativa
- 3 - 4 : Proceso de secado
  - disminuye temperatura
  - aumenta humedad relativa
- 4° - 5 : Deshumidificación
  - disminuye temperatura
  - disminuye el contenido de humedad.

## C A P I T U L O 5

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL BANCO EXPERIMENTAL

#### 5.1 Introducción

La construcción del banco se divide en tres partes

- Construcción del cuerpo principal con planchas de fierro galvanizado.
- Construcción de la estructura de soporte del cuerpo principal.
- Armado o ensamble de componentes

En la construcción del cuerpo principal de planchas de fierro galvanizado se utilizaron los servicios de un taller particular de hojalatería.

La estructura de soporte del cuerpo principal fué construido con materiales, herramientas de banco, equipo de soldadura eléctrica y autógena, taladro eléctrico, etc, del taller de la Facultad de Ciencias - U.N.I.

El ensamble de los componentes se hizo en el laborato

rio de la Facultad de Ciencias, utilizando las herramientas del propio laboratorio.

En cuanto a los componentes a instalar en el banco, para la deshumudificación del aire de secado se utiliza una unidad de acondicionamiento de aire. Como en el laboratorio se tenía dos de estos equipos, (uno marca National y el otro marca General Electric), ambos fueron probados instalándose definitivamente el que brindó mayores ventajas.

A continuación, se desarrolla las pautas seguidas en el diseño del banco experimental de secado.

## 5.2 Consideraciones de diseño

El diseño del banco experimental consiste principalmente en su dimensionamiento y en la selección del ventilador y deshumedecedor; para esto, debemos tomar en cuenta ciertas consideraciones, tales como, capacidad de cámara de secado y rangos de velocidad, humedad y temperatura del aire.

Estos valores serán adoptados según la capacidad requerida del equipo y los parámetros de secado recomendables para un óptimo desarrollo del proceso de secado y/o para evitar daños en los productos.

### 5.2.1 Capacidad de la cámara de secado

En el equipo experimental se van a realizar ensayos de secado con muestras representativas de diversos pro--

ductos. En ensayos de secado, una muestra se considera representativa si los resultados obtenidos son reproducibles a las operaciones en gran escala. Una muestra de 50 a 100 gr de un producto agrícola de naturaleza granular puede ser suficiente para obtener resultados satisfactorios en ensayos de secado, sin embargo, para hacer evaluaciones de caída de presión del aire al pasar a través del mismo producto, puede necesitarse entre 1000 y 2000 gramos. Además, si bien es cierto que una muestra de 50 gr de un determinado producto puede ser suficiente para un ensayo de secado, esto es muy relativo y más bien la cantidad de material a secar depende de las propiedades o características físicas del mismo, tales como su densidad, forma y tamaño.

Para tener la certeza de que en el equipo se va a poder realizar ensayos de secado de productos de diferentes características físicas, se asume como capacidad de cámara de secado 2000 gr de producto de características medias (contenido de humedad y peso específico).

### 5.2.2 Parámetros de secado

El objetivo fundamental del secado es reducir el contenido de humedad del producto, pero al mismo tiempo, los parámetros de secado deben ser seleccionados adecuadamente, de manera que garanticen que el producto no va a sufrir daños durante el proceso.

Varios parámetros influyen en el tiempo requerido para reducir el contenido de humedad del producto al nivel deseado y son tomados en cuenta en el diseño del equipo.

Son parámetros de secado manipulables : La temperatura, humedad relativa y flujo del aire. El contenido de humedad inicial, contenido de humedad final y contenido de humedad de equilibrio del producto, dependen de las características o propiedades del material a secar.

#### 5.2.2.1 Temperatura del aire

Es evidente que para tener una buena capacidad de producción de un equipo, conviene realizar el secado en el menor tiempo posible. Esto significa, que sería deseable tener un máximo potencial de secado ( $T_{\infty} - T_s$ ) o lo que es lo mismo tener aire de secado bien caliente, para tener la seguridad que su humedad relativa es bastante baja para remover la humedad del producto.

Sin embargo, se debe tener en consideración, que los materiales solo pueden soportar una cierta temperatura máxima sin deteriorarse, y que el secado muy rápido de algunos cuerpos produce estructuras superficiales cerradas que impiden el paso posterior de la humedad, afectando la calidad del material y la velocidad de secado normal.

Por tanto, la temperatura del aire  $T_{\infty}$  no debe ex-

ceder del valor límite  $T_{\text{máx}}$  que es característico para cada material.

De la tabla C.1, apéndice C, se extraen los siguientes rangos de temperatura máxima del aire de secado :

Granos	: 45	80 °C
Verduras	: 55	75 °C
Frutas	: 65	70 °C

Entonces, la máxima temperatura del aire de secado que debe obtenerse en el equipo experimental es 80 °C y si además consideramos que se deben realizar ensayos de secado con aire a baja temperatura ( $\approx$  a temperatura ambiente), se concluye que el rango de temperatura del aire de secado en el banco experimental debe ser : 25 - 80 °C.

Rango de temperatura : 25 - 80 °C

#### 5.2.2.2 Humedad relativa del aire

En el secado con aire, la velocidad de secado del producto depende también de la humedad relativa del aire. Si la humedad relativa es alta, alto es el contenido de agua en la corriente de aire y por tanto menor su capacidad para captar agua del producto. Sería aconsejable entonces, realizar el secado con una corriente de aire de baja humedad relativa, cosa que casi siempre se practica, pero, existen casos en que

para evitar el daño del producto (agrietamiento de grano en el caso del arroz) por el uso de altas temperaturas del aire, se requiere a la vez que éste tenga una alta humedad relativa, (en el caso del arroz para evitar el agrietamiento se usa en su secado aire con alta humedad a una elevada temperatura).

Es por tanto necesario, que la humedad relativa de la corriente de aire en el equipo pueda ser fijada dentro del rango de 10 a 100 %, para asegurarnos de poder simular cualquier situación posible.

Rango de humedad relativa : 10 - 100 %

#### 5.2.2.3 Flujo de aire

El flujo de aire influye en la velocidad de secado del producto húmedo, porque es el agente que debe captar y llevar consigo el agua evaporada.

Un mayor flujo de aire a través del producto húmedo, puede llevar mayor cantidad de vapor de agua. Además, a mayor velocidad, (dentro de un determinado rango), se tiene un mayor coeficiente de transmisión de calor por convección y por consiguiente un mayor intercambio de energía entre el aire y el material que se está secando.

Lo anterior nos da la idea que el secado debe realizarse a altas velocidades del aire, sin embargo, esto no sucede así, debido a que cualquiera que sea

la fuente de energía para el calentamiento del aire a menor velocidad de paso de éste, mayor es el incremento de temperatura obtenido, esto debido a la presencia del mecanismo de convección natural adicionado al de convección forzada.

En la práctica, en el secado solar se tendrá un secado económico si la velocidad del aire no se excede de 0.4 m/s; pudiéndose usar en la mayoría de los casos una velocidad de 0.1 m/s y menor que ésta si el tiempo de secado juega un menor rol dentro del proceso.

En la cámara de secado del banco experimental se debe lograr velocidades del aire comprendidas en un rango adecuado, de tal manera que se pueda simular tanto las condiciones de uso práctico como otras que eventualmente podrían necesitarse.

El rango de velocidades en la cámara de secado debe ser de 0 a 1 m/s.

Rango de velocidades : 0 - 1 m/s.

#### 5.2.2.4 Características del material a secar

Los materiales que usualmente se secan, tienen su contenido de humedad comprendido en los siguientes rangos :

- Contenido de humedad inicial

$$M_i : 0.20 - 0.85$$

$$X_{p,i} : 0.25 - 5.66$$

- Contenido de humedad final

$$M_f : 0.04 - 0.24$$

$$X_{p,f} : 0.04 - 0.315$$

- Contenido de humedad de equilibrio

Los valores del contenido de humedad de equilibrio se obtienen del diagrama de equilibrio del material.

### 5.3 Dimensionamiento del banco experimental

#### 5.3.1 Dimensiones de la cámara de secado y de los elementos de soporte de material

En la descripción del banco experimental, se ha indicado que la cámara de secado es una porción del ducto principal, por tanto la sección de paso del aire para ambos es la misma y su dimensionamiento debe hacerse satisfaciendo requerimientos comunes.

Para dimensionar la cámara de secado consideramos como datos la capacidad requerida y la densidad promedio de algunos materiales.

- Capacidad requerida de la cámara de secado ( $M_m$ )

$$M_m = 2 \text{ kg de materia húmeda}$$

- Densidad promedio de algunos materiales ( $\rho_m$ ); kg/m<sup>3</sup>
  - cacao : 480
  - maíz : 700
  - trigo : 700
  - café : 724

La materia húmeda será colocada dentro de la cámara de secado en un elemento de soporte, que puede ser en forma de bandeja o en forma de un paralelepípedo, según el tipo de ensayo a realizarse.

La capacidad del elemento de soporte debe ser igual al volumen de materia a secar y será mayor a menor densidad del material. Consideremos entonces que para los cálculos,  $\rho_m$ , la densidad del material a secar, es 480 kg/m<sup>3</sup>

- Volumen de materia a secar ( $V_m$ )

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m}$$
$$V_m = \frac{2 \text{ kg}}{480 \text{ kg/m}^3} = 4.1666 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$
$$V_m = 4166.6 \text{ cm}^3$$

- Dimensiones del elemento de soporte tipo paralelepípedo.

Capacidad del elemento : 4166 cm<sup>3</sup>

Esto equivale a un cubo de 16 cm de lado, pero pensando en el espacio requerido para los instrumentos de medición, se adopta una sección de duc-

to de 30 x 20 cm. Entonces la razón de aspecto del ducto es de 1.5:1, valor bastante aceptable para nuestros requerimientos, pues de las figuras 5.1 y 5.2, observamos que el incremento de la pérdida de calor a través del ducto al exterior y el incremento del costo de instalación, aumentan, a mayor valor de la razón de aspecto.

Por tanto las dimensiones del elemento serían 30 x 20 x 7 cm; pudiendo adoptarse el espesor de 5 cm sin alterar mayormente la capacidad requerida en los ensayos.

Dimensiones del elemento : 300 x 200 x 50 mm.

Material de construcción : marco de madera y malla metálica.

- Dimensiones del elemento de soporte tipo bandeja

Capacidad del elemento :  $4166 \text{ cm}^3$

Espesor de material : En los ensayos se colocarán capas de productos de 3 a 4 cm.

Considerando el ancho de 26 cm, el largo de la bandeja será 46 cm.

Dimensiones de la bandeja : 460 x 260 mm

Material de construcción : marco de ángulo de aluminio y malla metálica.

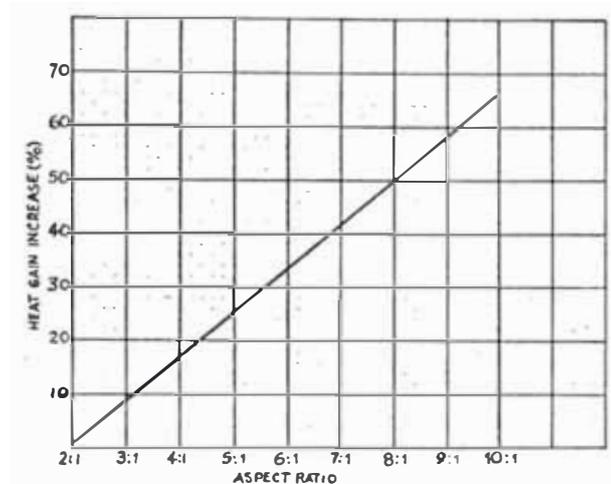


Figura 5.1 Calor perdido del ducto al exterior vs razón de aspecto

Fuente : Ref. bibliográfica N<sup>o</sup> 4

Anotamos que la figura 5.2, está basada en el costo de instalación de 100 pies de ducto circular y rectangular con varias razones de aspecto, todos de igual capacidad de transporte de aire. El costo de instalación de ducto rectangular con una razón de aspecto de 1:1, es usado en la figura como el 100 % del costo.

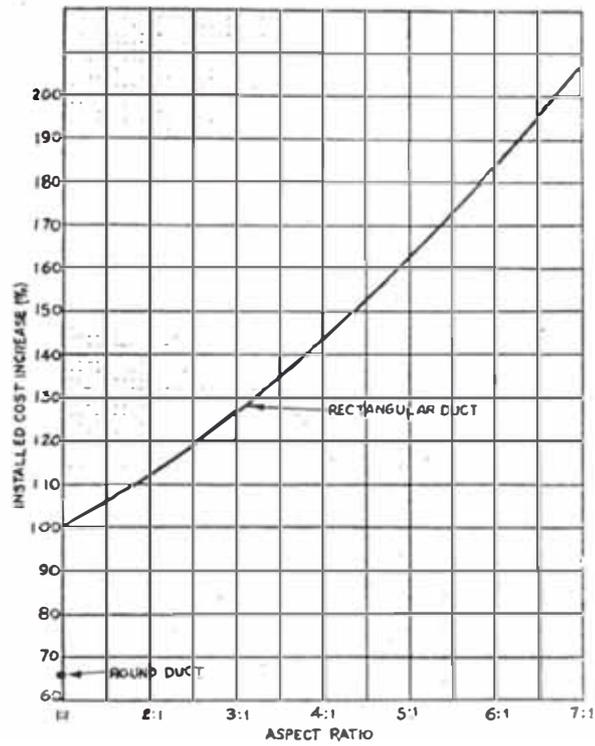


Figura 5.2 Costo instalado vs razón de aspecto del ducto

Fuente : Ref. bibliográfica Nº 4

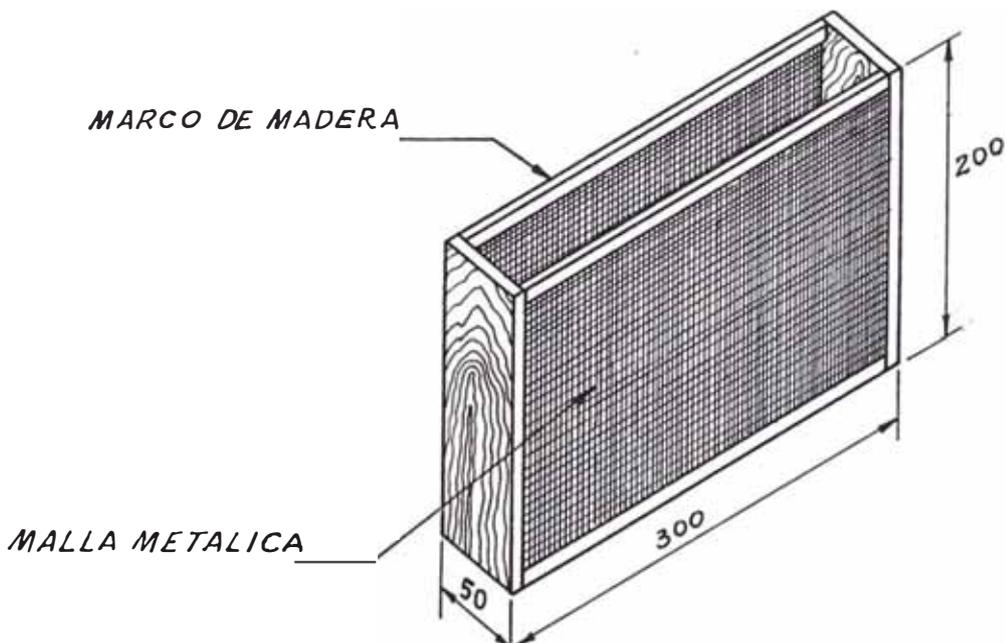


Figura 5.3 Elemento de soporte de material-tipo paralelepípedo-

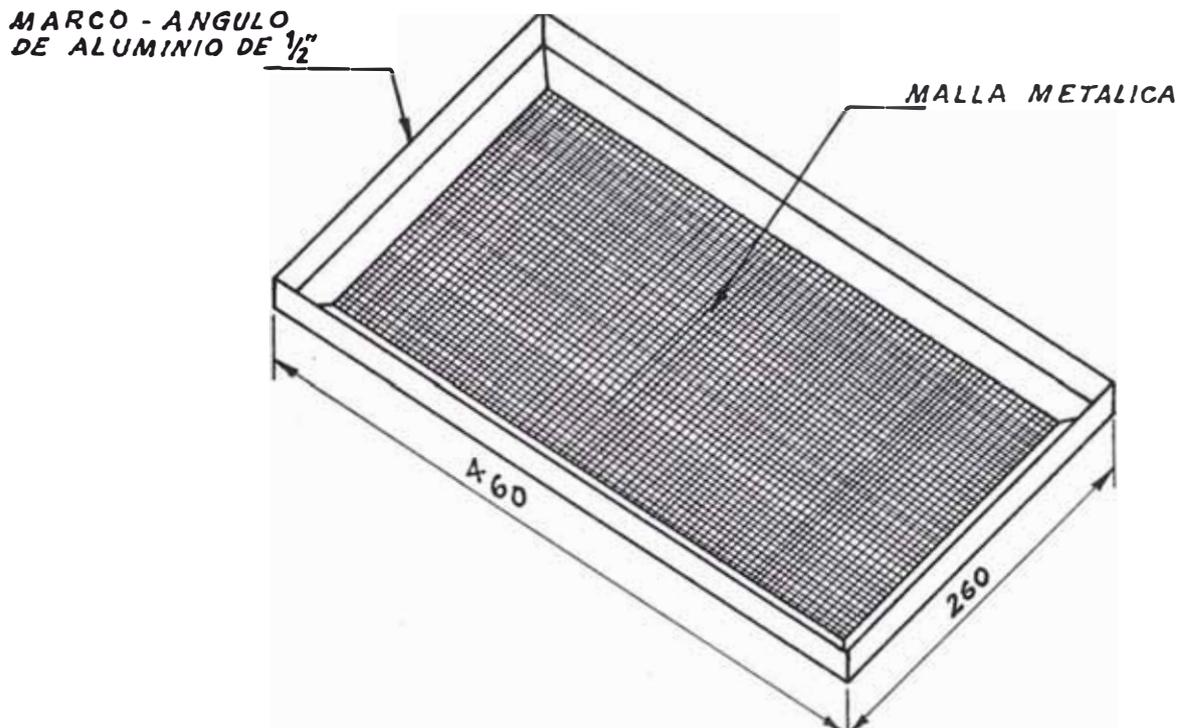


Figura 5.4 Elemento de soporte de material-tipo bandeja-

- Dimensiones de la cámara de secado

La sección de la cámara de secado es de 30 x 20 cm y la longitud se asume en función de las dimensiones del elemento de soporte de material tipo bandeja.

Dimensiones de la cámara : 600 x 300 x 200 mm.

5.3.2 Dimensiones del cuerpo principal del equipo

Las dimensiones de la cubierta o cuerpo principal, serán asumidas en función del espacio requerido para instalar los componentes del equipo y en lo posible se tra-

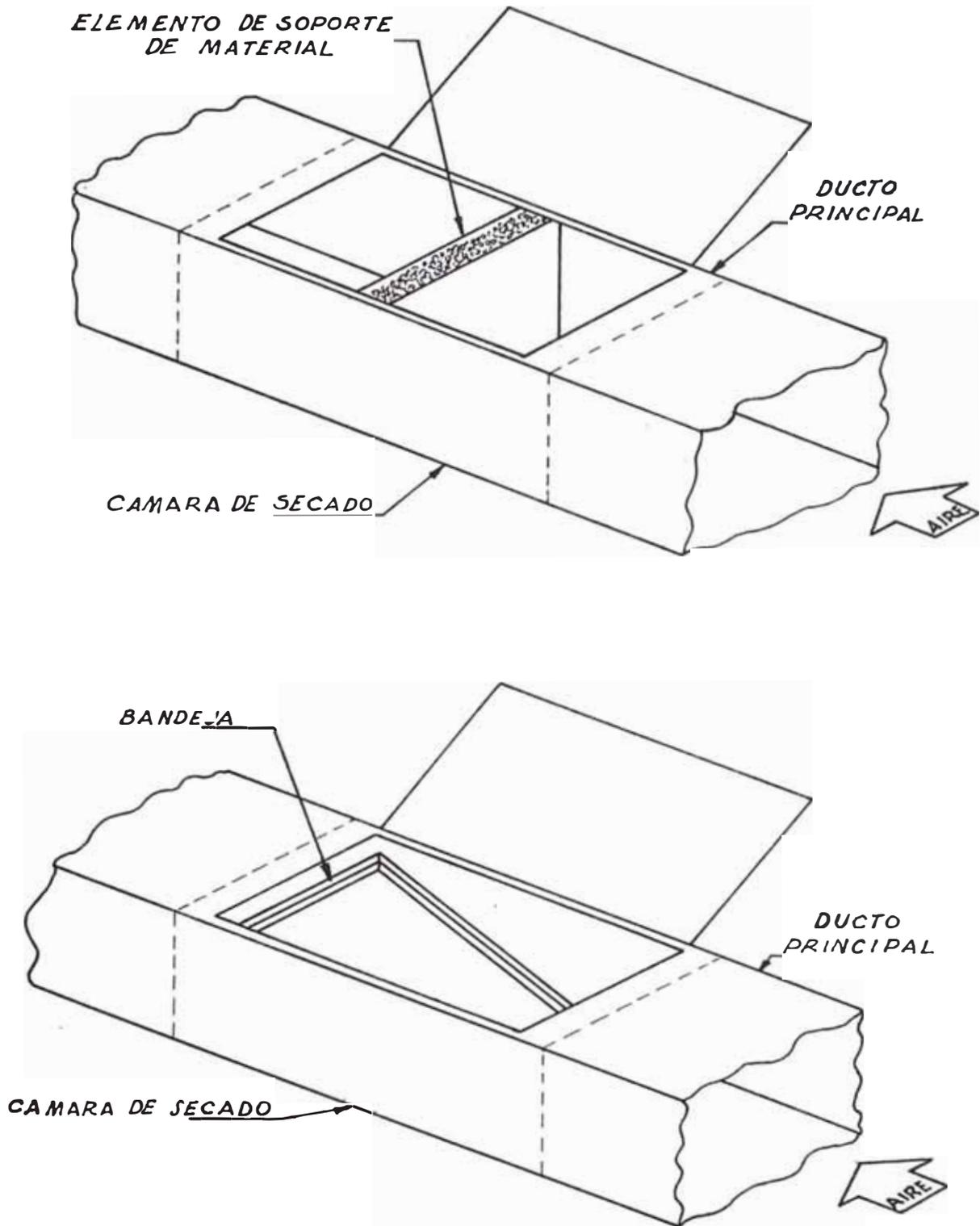


Figura 5.5 Elementos de soporte ubicados en la cámara de secado.

tará de reducir los espacios libres con el propósito de minimizar el costo de construcción.

La cubierta será hecha de planchas de fierro galvanizado de 1/40" de espesor y su construcción por piezas brindará accesibilidad tanto para la instalación de los componentes, durante la construcción, como para un rápido desmontaje de algunos de éstos en caso de avería durante su operación. Las piezas se unirán entre sí mediante juntas corredizas. Como el sistema es de baja presión, de la figura 5.6 seleccionamos la junta corrediza A.

Además, será necesario tener una puerta de acceso a la cámara de secado para la manipulación de muestras e instrumentos de medición. La puerta de acceso tendrá cubierta de vidrio para realizar ensayos de secado mixto.

El cuerpo principal será dividido en cinco partes o piezas componentes. Todas las piezas tienen la configuración general de un ducto con costura, sea recto o con cambio de dirección. Las costuras serán soldadas con soldadura de puntos. En la figura 5.7 se puede observar la división del cuerpo principal en cinco piezas principales y dos elementos de unión numeradas como piezas N<sup>o</sup> 6 y 7.

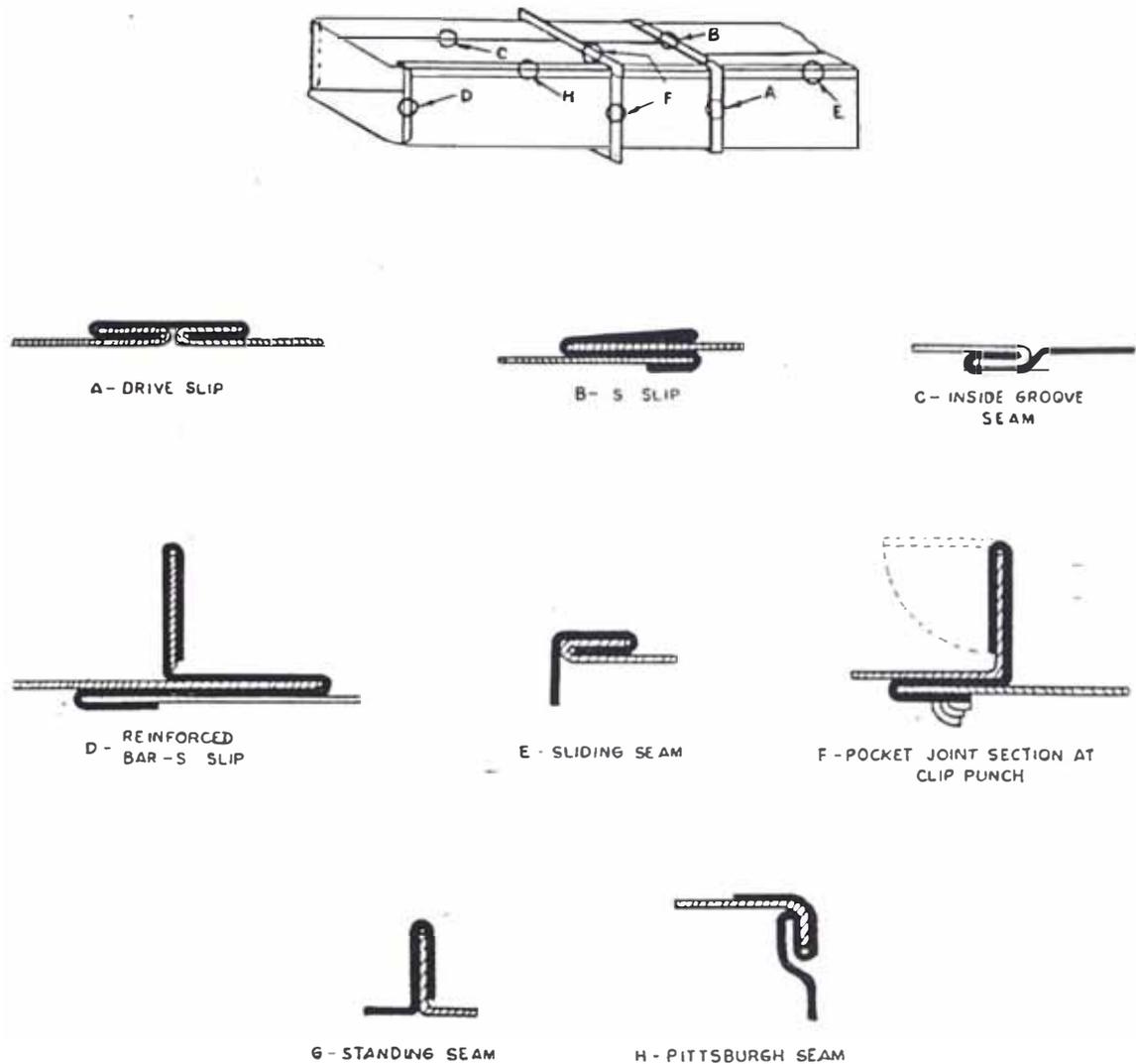


Figura 5.6 Juntas y costuras para sistemas de baja presión

Fuente : Ref. bibliográfica N<sup>o</sup> 4

Las dimensiones exactas de la pieza N<sup>o</sup> 1, serán determinadas en función de las dimensiones del ventilador, es decir, después de su selección; pero para poder dimensionar las otras piezas debemos darle medidas aproximadas en función de las dimensiones de un ventilador que entregue aproximadamente el caudal de aire requerido.

Así tenemos, que para la sección de ducto de 200 x 300 mm y una velocidad máxima de 2 m/s (la máxima veloci

dad requerida es 1 m/s, por seguridad se considera, en primera instancia 2 m/s), se tiene un flujo de  $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$  (254 CFM); luego, del catálogo de ventiladores centrífugos LAU (ver apéndice H), se observa que los modelos que más se aproximan al requerimiento de flujo de aire son A9-6 ACE , A9-7 ACE , A9-9 ACE.

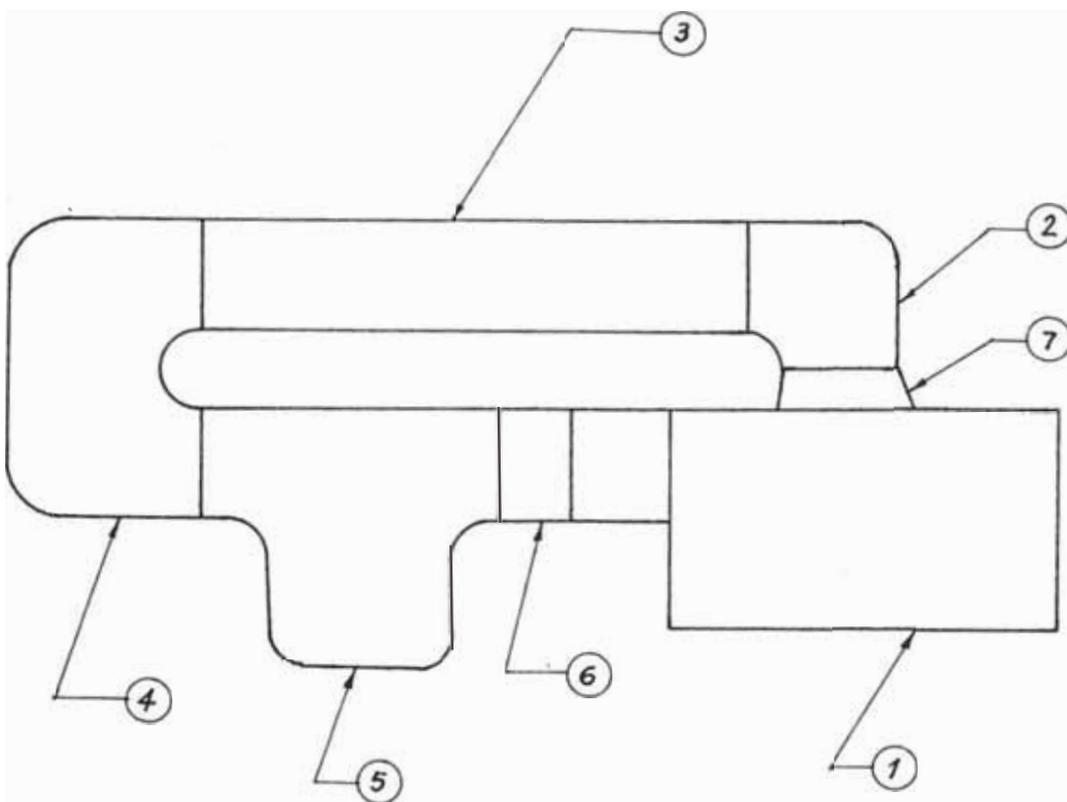


Figura 5.7 División en piezas del cuerpo principal del equipo

Podemos considerar solo para darnos una idea de las dimensiones de la caja de succión, un ventilador de dimensiones aproximadas a los modelos antes mencionados, ver figura 5.8.

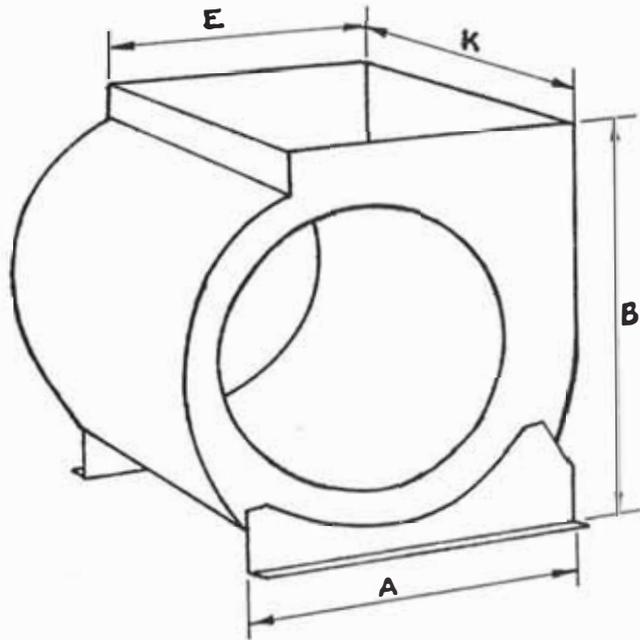


Figura 5.8 Dimensiones características de un ventilador

$$\begin{aligned} \text{Si : } K &= E = 10'' \approx 250 \text{ mm} \\ B &= 15'' \approx 380 \text{ mm} \\ A &= 16'' \approx 400 \text{ mm} \end{aligned}$$

Entonces las dimensiones de la caja de succión serán aproximadamente iguales a las que se presentan en la figura 5.9.

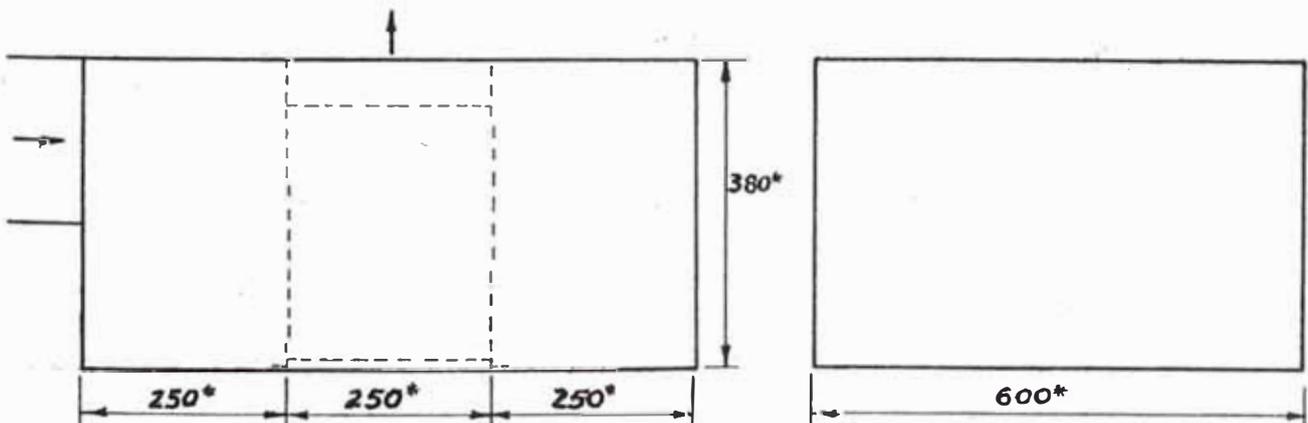


Figura 5.9 Dimensiones aproximadas de la caja de succión

La pieza N<sup>o</sup> 5 alojará en su interior al elemento deshumedecedor del aire de secado. Como se va a probar los dos deshumedecedores que se tiene en el laboratorio y dado que las dimensiones de éstos son diferentes, es que se construye dos piezas N<sup>o</sup> 5.

a) Pieza N<sup>o</sup> 5 para el deshumedecedor National

Esta unidad de deshumidificación es pequeña y bastante compacta, por lo que el evaporador y condensador están unidos por medio de aletas comunes a ambos. Por tanto, aunque lo deseable sería instalar dentro del equipo solo el serpentín evaporador, se tiene que instalar dentro de la pieza N<sup>o</sup> 5, el evaporador y el condensador, dejando fuera del mismo solo al compresor.

Las dimensiones de la pieza N<sup>o</sup> 5 para el deshumedecedor se indican en la figura N<sup>o</sup> 5.10.

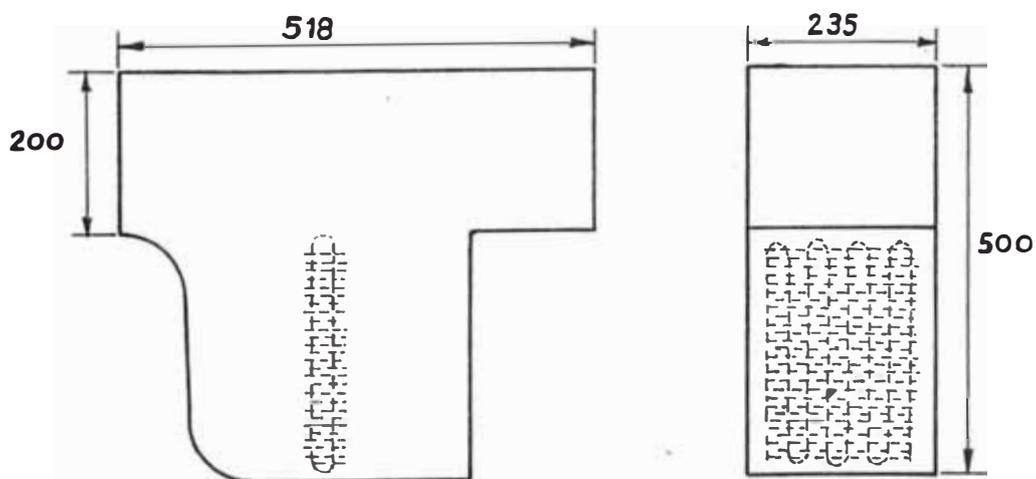


Figura 5.10 Dimensiones de la pieza N<sup>o</sup> 5 para el deshumedecedor National.

b) Pieza N<sup>o</sup> 5 para el deshumedecedor General Electric

Esta unidad de deshumidificación es más grande que la National y el evaporador puede separarse del condensador doblando convenientemente la tubería de cobre. En este caso se instala dentro de la pieza N<sup>o</sup> 5 solo el serpen<sup>t</sup>ín evaporador. Las dimensiones se muestran en la figura N<sup>o</sup> 5.11.

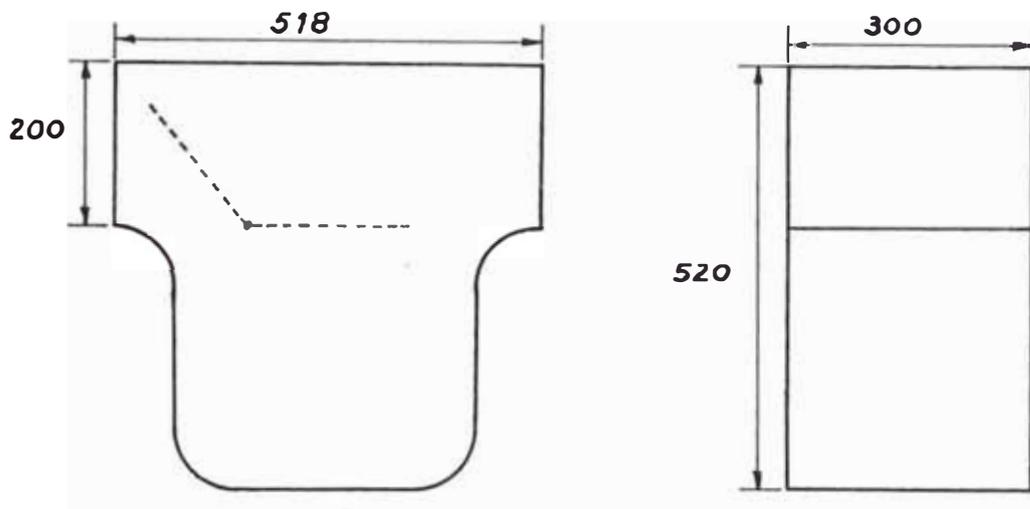


Figura 5.11 Dimensiones de la pieza N<sup>o</sup> 5 para el deshumedecedor General Electric

La sección de la pieza N<sup>o</sup> 3 es de 300 x 200 mm, así también las secciones de entrada y salida del codo N<sup>o</sup> 2 y de la pieza N<sup>o</sup> 4.

La sección de entrada y salida de la pieza N<sup>o</sup> 5, para el deshumedecedor National, es de 235 x 200 mm y debe unirse a la pieza N<sup>o</sup> 4 y a la caja de succión. Se utiliza un corto elemento de unión, de sección constante de 235 x 200 mm, para unir la pieza N<sup>o</sup> 5 con la caja de succión y

un elemento de cambio de sección (pieza N<sup>o</sup> 6) de 300 x 200 mm a 235 x 200 mm, para unirla con la pieza N<sup>o</sup> 4.

La pieza N<sup>o</sup> 5 para el deshumecedor General Electric tiene sección de entrada y salida de 300 x 200 mm y por tanto, la sección de entrada se une directamente con la pieza N<sup>o</sup> 4 y la sección de salida se une al elemento de cambio de sección y éste a su vez al elemento de sección constante.

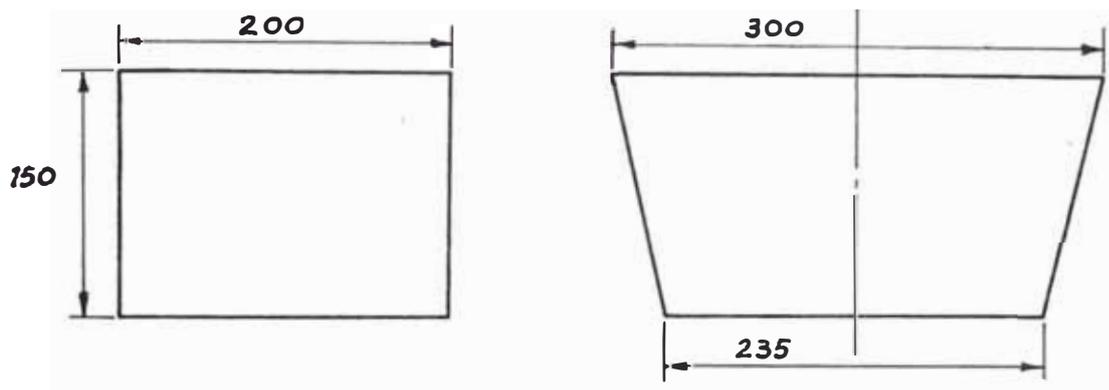


Figura 5.12 Dimensiones del elemento de cambio de sección - pieza N<sup>o</sup> 6

En la figura 5.13 se ilustra el banco experimental con las dimensiones de las piezas en las que ha sido dividido. Las dimensiones que aparecen marcadas con asterisco son aproximadas, y su valor definitivo se dará después de la selección del ventilador, junto con las del elemento N<sup>o</sup> 7.

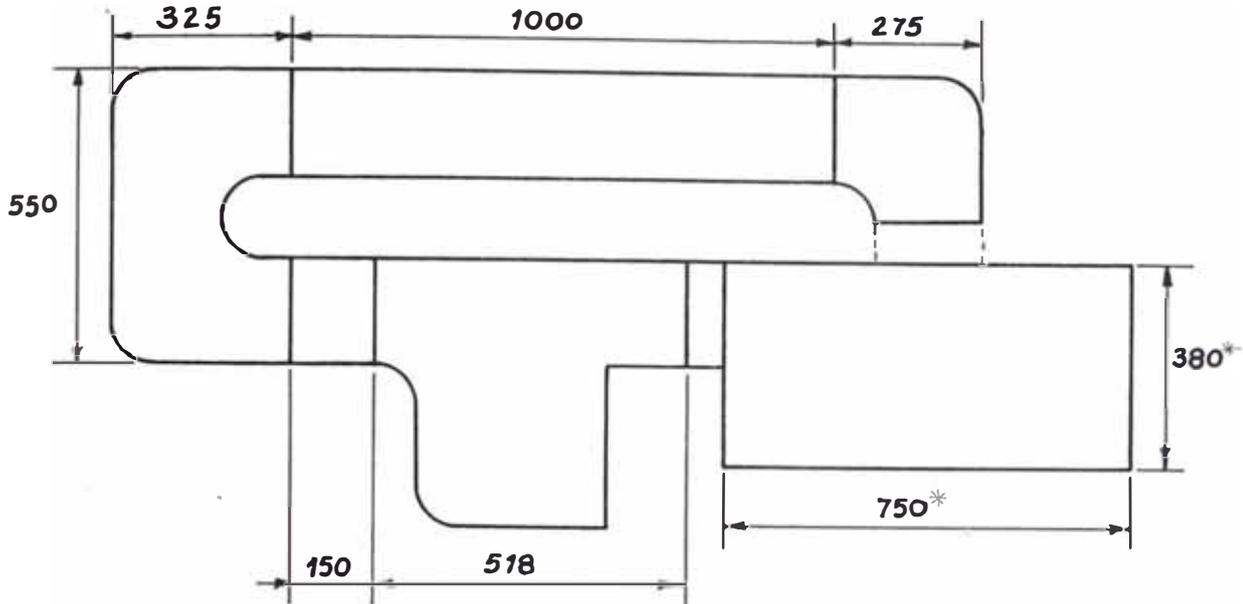


Figura 5.13 Dimensiones de las piezas del banco experimental

#### 5.4 Cálculo de pérdidas de presión

Para proceder de una manera ordenada en el cálculo de pérdidas de presión, definiremos primero algunos términos y relaciones necesarios para su desarrollo.

##### 5.4.1 Definiciones y relaciones matemáticas

Tipos de flujo El movimiento de un fluido puede clasificarse de muchas maneras, así tenemos:

Flujo permanente, es aquel cuyas propiedades del fluido y las condiciones del movimiento no cambian con el tiempo, así :  $\partial V/\partial t = 0$  .

Se dice que un flujo es uniforme, cuando la aceleración convectiva es cero, es decir, el vector velocidad es idéntico en cada punto en el campo de flujo, es decir :  $\partial V/\partial S = 0$  .

Flujo turbulento, es aquel tipo de flujo caracterizado por el movimiento desordenado de las partículas del fluido con un violento intercambio transversal de cantidades de movimiento.

Flujo laminar, es aquel en el cual las partículas del fluido se desplazan suavemente a lo largo de trayectorias lisas, desplazándose paralelamente unas a otras con solo un intercambio molecular de cantidad de movimiento.

Número de Reynolds El flujo puede ser laminar o turbulento, esto se expresa por el parámetro adimensional denominado Número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{\rho V L}{\mu} \dots\dots\dots(5.1)$$

- Donde · V : velocidad del fluido; m/s  
L : longitud característica; m  
 $\nu$  : viscosidad cinemática; m<sup>2</sup>/s  
 $\rho$  : densidad del fluido; kg/m<sup>3</sup>  
 $\mu$  : viscosidad dinámica; kg/m·s

El flujo es laminar para  $Re < 2000$  y turbulento para  $Re > 4000$ . Un flujo cuyo número de Reynolds esté comprendido en la zona crítica, es decir,  $Re$  entre 2000 y 4000 puede ser unas veces laminar y otras turbulento.

Número de Reynolds modificado Cuando se tiene un lecho de productos granulados, a través del cual pasa un flujo de aire, se usa este parámetro adicional que es definido como (Ref. Nº 15)

$$Re' = \frac{\rho V de}{\mu(1 - E)} \dots\dots\dots(5.2)$$

Donde :  $\rho$  : densidad del aire;  $kg/m^3$

$V$  : velocidad del aire considerando el área de la sección transversal vacía;  $m/s$

$de$ : diámetro esférico equivalente de las partículas;  $m$

$\mu$ : viscosidad dinámica del aire;  $kg/m s$

$E$  : porosidad del lecho; adimensional

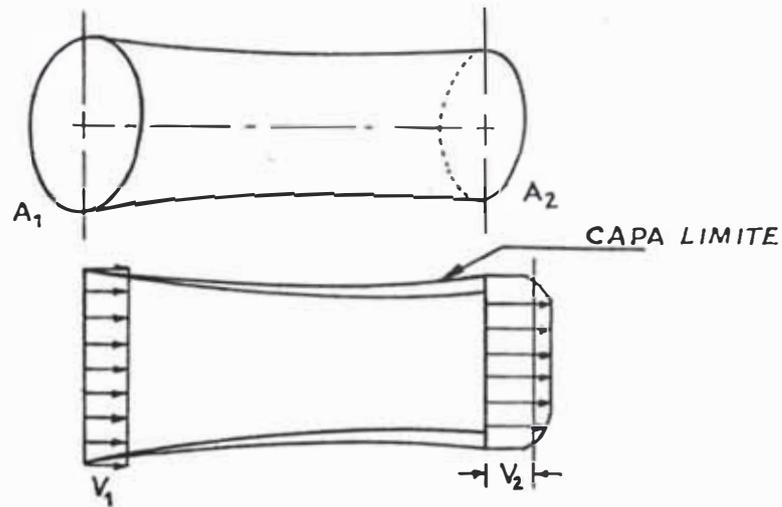
Ecuación de continuidad Sea un canal por el cual pasa un fluido, como el de la figura que se muestra a continuación, si consideramos que se tiene un flujo permanente adimensional cuyos parámetros de flujo cambian solo al pasar de una sección a otra entonces, en virtud al principio general de conservación de la masa, se cumple que la masa que entra por la sección 1 es igual a la masa que sale por la sección 2.

Es decir :  $\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 A_2 V_2 \dots\dots\dots(5.3)$

Donde :  $V_1, V_2$  : velocidades medias normales a las sec-

ciones transversales  $A_1$  y  $A_2$ , respectivamente; m/s

$\rho$  : densidad, que se supone uniforme a través de la sección transversal;  $\text{kg/m}^3$



Pérdidas de presión en ductos ( $h_p$ ) Las pérdidas de presión del aire o cualquier fluido que circula a través de ductos resultan de la fricción con las paredes, restricción al flujo, cambios de dirección y ensanchamiento o contracción del área de la sección transversal del ducto.

En el caso de secado, hay que agregar también las pérdidas de presión del aire al pasar a través del producto.

Pérdidas de presión por fricción con el ducto ( $h_f$ )

$$h_f = f \frac{L}{D_h} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (5.4)$$

Donde :  $h_f$  = pérdida de presión; mm.c.a

$f$  : factor de fricción del ducto; adimensional

$L$  : longitud del ducto; m

$D_h$  : diámetro hidráulico del ducto; m

$\rho$  : densidad del fluido;  $\text{kg/m}^3$

$V$  : velocidad media del fluido; m/s

$g$  : aceleración de la gravedad;  $9.8 \text{ m/s}^2$

Pérdidas debido a los accesorios ( $h_s$ )

- Método del coeficiente de resistencia

$$h_s = k \cdot \rho \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(5.5)$$

Donde :  $h_s$  : pérdidas de presión debido al accesorio;  
mm.c.a

$k$  : coeficiente de resistencia; adimensional

$\rho$  : densidad del fluido;  $\text{kg/m}^3$

$V$  : velocidad media del fluido; m/s

- Método de la longitud equivalente

$$h_s = f \frac{L_e}{D_h} \rho \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(5.6)$$

Donde :  $L_e$  : longitud de ducto recto que produce las mismas pérdidas que el accesorio; m

Los demás factores tienen el mismo significado de las ecuaciones anteriores.

Pérdidas debido al paso del aire a través de un lecho de productos granulares ( $h_{\text{prod}}$ )

La pérdida de presión de un flujo de aire al atravesar un lecho de partículas granulares se evalúa mediante la siguiente fórmula, obtenida de referencia N<sup>o</sup> 15.<sup>(1)</sup>

$$h_{\text{prod}} = 2f' \frac{1 - E}{E^3} \frac{L}{d_e} \frac{\rho V^2}{2g} \dots\dots\dots(5.7)$$

$$f' = \frac{160}{\text{Re}'} + \frac{3.1}{(\text{Re}')^{0.1}} \dots\dots\dots(5.8)$$

$$\text{Re}' = \frac{\rho V d_e}{\mu (1 - E)} \dots\dots\dots(5.8.a)$$

- Donde :
- $h_{\text{prod}}$  : pérdida de presión; mm.c.a
  - $\text{Re}'$  : número de Reynolds modificado; adimensional
  - $E$  : porosidad o relación de vacíos, ver ecuación 6.2; capítulo 6
  - $L$  : espesor o longitud del lecho; m
  - $d_e$  : diámetro equivalente de las partículas; m  
ver ecuación 6.3; capítulo 6
  - $\rho$  : densidad del aire;  $\text{kg/m}^3$
  - $V$  : velocidad media del aire en el ducto vacío  
m/s

Con la figura 5.14 se obtiene el ducto circular equivalente, a partir de los lados de un ducto rectangular; en las figuras 5.15, 5.16 y 5.17, se presentan los valores del coeficiente  $k$  de la ecuación 5.5.

1) Ver otras fórmulas en apéndice D.2.

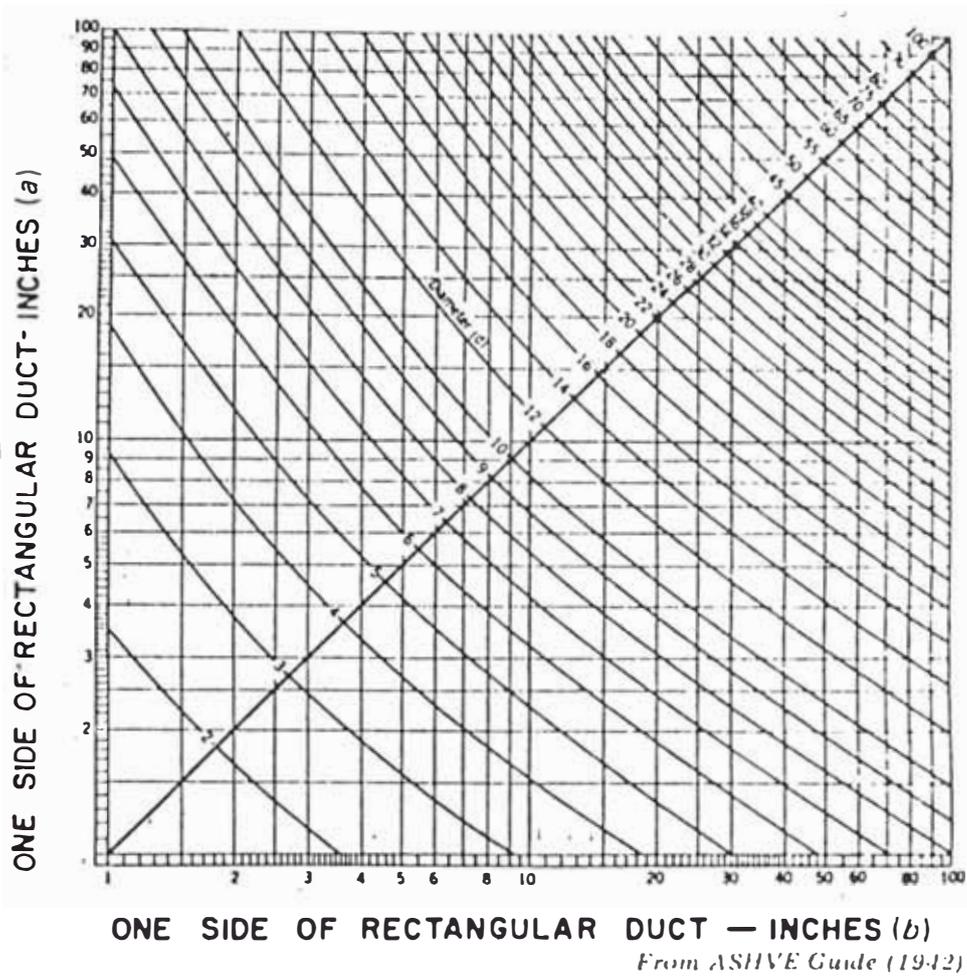


Figura 5.14 Equivalencia entre ductos circulares y rectangulares

Ref. bibliográfica N<sup>o</sup> 2

$$d = 1.265 \sqrt[5]{\frac{(a b)^3}{(a + b)}}$$

ILLUSTRATION	CONDITIONS	PRESSURE LOSS			
		L	L/D	L/W	
	RECTANGULAR OR ROUND, WITH OR WITHOUT VANS	$\frac{L}{90}$ TIMES VALUE FOR SIMILAR 90-DEG. ELBOW			
	MITER R/D = 0.5 0.75 1.0 1.5 2.0	1.30 0.90 0.45 0.33 0.24 0.19	65 25 17 12 10		
					
		H/W	R/w		
			MITER		
			0.5	1.25	25
		0.25	0.75	0.60	12
			1.0	0.37	7
			1.5	0.19	4
			MITER	1.47	49
			0.5	1.10	40
		0.5	0.75	0.90	16
			1.0	0.28	9
			1.5	0.13	4
			MITER	1.50	79
		1.0	0.5	1.00	50
			0.75	0.41	21
			1.0	0.22	11
		1.5	0.09	4.5	
		MITER	1.68	110	
	4.0	0.5	0.96	65	
		0.75	0.37	45	
		1.0	0.19	17	
		1.5	0.07	6	
					
					
	CONSIDER EQUAL TO A SIMILAR ELBOW. BASE LOSS ON ENTERING VELOCITY.				

From ASHRAE (1969)

TOTAL PRESSURE LOST DUE TO ELBOWS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Based on friction values of approximately 0.02.

Values based on various sources; see ASHRAE (1969) for references

Figura 5.15 Coeficiente k de pérdida de presión total debido a codos. Fuente : Ref. bibliog. Nº 2

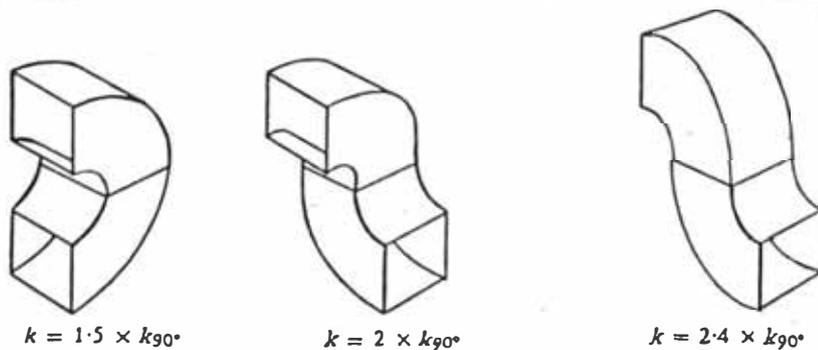


Figura 5.16 Coeficiente k de pérdida de presión total para distintas uniones de dos codos de 90° Fuente : Ref. bibliográfica Nº 11

TYPE	ILLUSTRATION	CONDI- TIONS	LOSS COEFFICIENT	
			$c_1$	$c_2$
ABRUPT EXPANSION		$A_1/A_2$		
		0.1	0.81	81.00
		0.2	0.64	16.00
		0.3	0.49	5.00
		0.4	0.36	2.25
		0.5	0.25	1.00
		0.6	0.16	0.45
		0.7	0.09	0.18
		0.8	0.04	0.06
0.9	0.01	0.01		
GRADUAL EXPANSION		$\theta$	$c_1$	
		$5^\circ$	0.17	
		$7^\circ$	0.22	
		$10^\circ$	0.28	
		$20^\circ$	0.45	
		$30^\circ$	0.59	
$40^\circ$	0.75			
ABRUPT EXIT		$A_1/A_2 = 0$	$c_1 = 1.00$	
ABRUPT CONTRACTION		$A_2/A_1$	$c_2$	
		0.0	0.34	
		0.2	0.32	
		0.4	0.25	
		0.6	0.16	
0.8	0.06			
GRADUAL CONTRACTION		$\theta$		
		$30^\circ$	0.02	
		$45^\circ$	0.04	
$60^\circ$	0.07			
EQUAL AREA TRANSFORMATION		$A_1 = A_2$	$c_1$ OR $c_2$	
		$\theta \leq 14^\circ$	0.15	

\* From ASHRAE (1969)

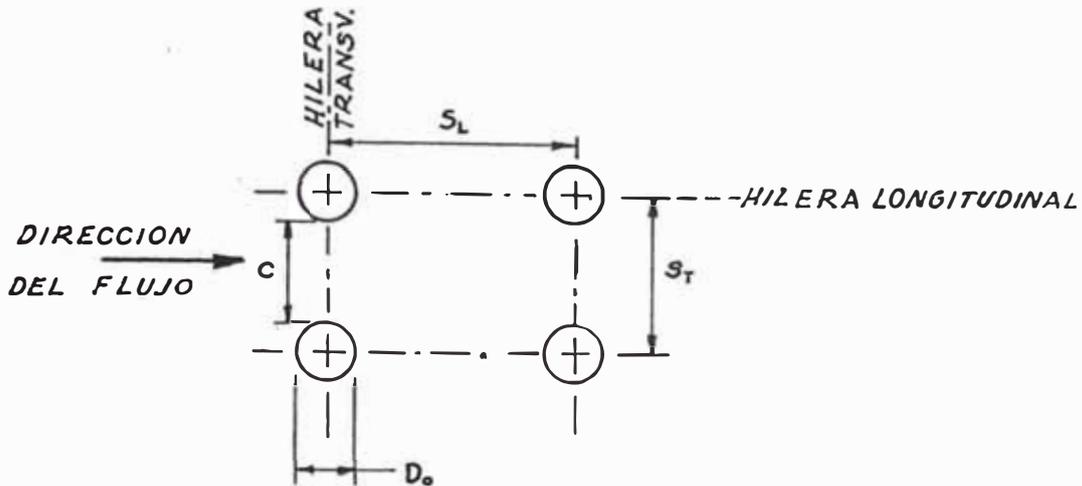
LOSS COEFFICIENTS FOR AREA CHANGE

Values based on various sources, see ASHRAE (1969) for refer

Figura 5.17 Coeficiente de pérdida de presión total  $k$  debido a cambios de área

Fuente : Ref. bibliográfica N° 2

Pérdida de presión al pasar un fluido sobre un haz de tubos



Para una disposición de tubos como se muestra en la figura anterior, las pérdidas de presión puede evaluarse por medio de la siguiente ecuación (Fuente : Ref. N° 13)

$$\Delta p = \frac{f_e (G_{\text{máx}})^2 N}{f_b (2.09 \cdot 10^8)} \left( \frac{\mu_s}{\mu_b} \right)^n \dots \dots \dots (5.9)$$

Donde : Para números de Reynolds ( $Re = G_{\text{máx}} D_o / \mu_f$ ) mayores que 1000,  $n=0.14$  y el factor  $f$  se calcula con la siguiente ecuación :

$$f = \left[ 0.044 + \frac{0.08 S_L / D_o}{\left( \frac{S_T - D_o}{D_o} \right) \left( 0.43 + 1.13 D_o / S_L \right)} \right] \left[ \frac{G_{\text{máx}} D_o}{\mu_b} \right]^{-0.15} \dots \dots \dots (5.10)$$

Para flujo laminar el factor  $f$  puede obtenerse de la figura 5.18 y el coeficiente  $n=0.25$

$\Delta p$  : caída de presión por rozamiento;  $\text{lb}/\text{pie}^2$

$G_{\text{máx}}$ : velocidad de la masa en el área mínima;  
 $\text{lb}/\text{hr pie}^2$

$N$  : número de hileras transversales

- $\rho$  : densidad del fluido; lb/pie<sup>3</sup>
- $\mu_s$  : viscosidad absoluta del fluido a la temperatura de superficie de los tubos  $T_s$ ; lb/pie s o en lb/pie hr
- $\mu_b$  : viscosidad absoluta del fluido a la temperatura de mezcla  $T_b$ ; lb/pie s ó lb/pie hr
- $f_e$  : factor empírico de rozamiento; adimensional

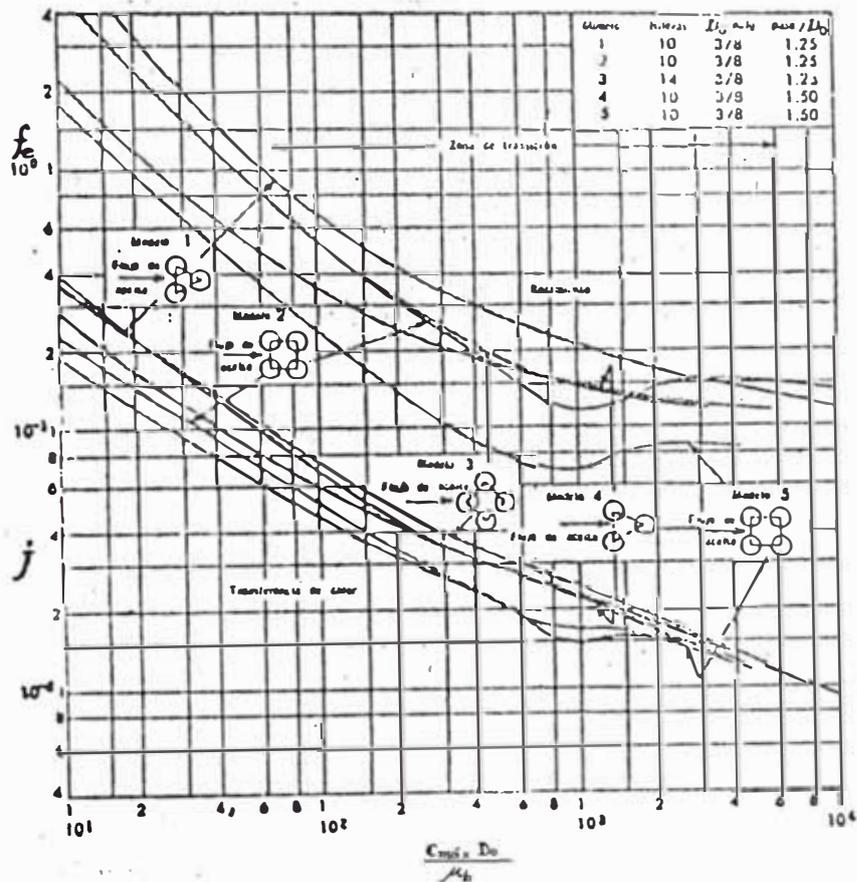


Figura 5.18 Datos del factor  $f_e$  promedio para flujo en el régimen laminar y de transición

Fuente : Ref. bibliográfica N<sup>o</sup> 13

#### 5.4.2 Caída de presión a través del sistema

En el cálculo de la caída de presión a través del sistema se tendrán en consideración los rangos de variación de las propiedades del aire.

Velocidad : 0 - 1 m/s

Humedad relativa : 10 - 100 %

Temperatura : 25 - 80 °C

La temperatura y humedad relativa del aire influyen en el valor de su densidad. Reemplazando en la ecuación 2.27 los valores de temperatura y humedad relativa comprendidos en los rangos de diseño y que produzcan valores de la humedad absoluta menores de 0.05 kg agua/kg a.s, se construye la siguiente tabla.

$\begin{matrix} T(^{\circ}C) \\ \phi(\%) \end{matrix}$	25	30	40	50	60	70	80
10	1.182	1.162	1.123	1.086	1.051	1.016	0.981
20	1.180	1.160	1.120	1.081	1.043	1.004	0.963
30	1.179	1.158	1.117	1.076	1.035	0.992	
40	1.117	1.156	1.114	1.071	1.027		
50	1.176	1.154	1.111	1.066	1.019		
60	1.175	1.152	1.108	1.061			
70	1.173	1.151	1.105				
80	1.172	1.149	1.101				
90	1.170	1.147	1.098				
100	1.169	1.145	1.095				

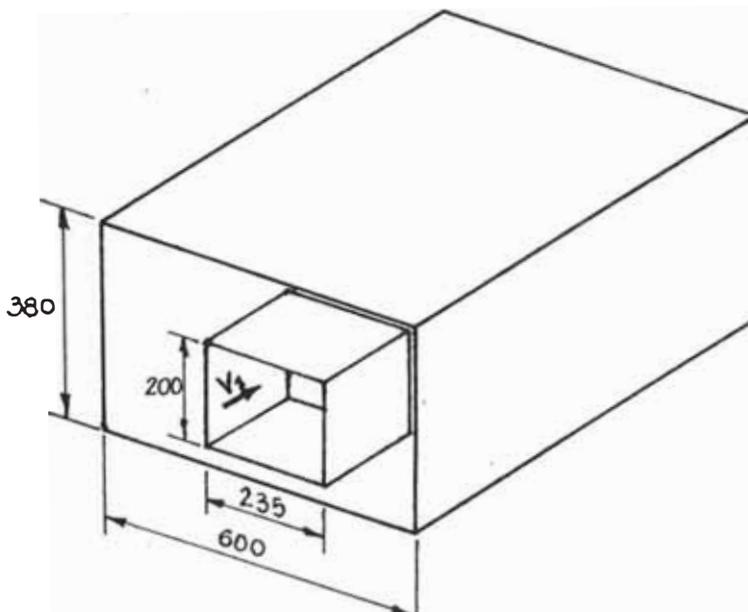
Tabla 5.1 Densidad del aire;  $kg/m^3$ , para una temperatura y humedad relativa dados, considerando la presión total  $1.033 kg/cm^2$

Los siguientes cálculos se hacen considerando que la velocidad del aire en la cámara de secado es la máxima del rango de diseño, es decir,  $V_0 = 1 m/s$ . Además, como el mayor valor de la caída de presión ocurre a mayor valor de

la densidad del aire, es decir, de la tabla 5.1 a  $T=25^{\circ}\text{C}$  y  $\phi=10\%$ , los cálculos se realizan bajo éstas condiciones. En los casos en que se pueda evaluar la caída de presión por el método del coeficiente de resistencia y el método de la longitud equivalente, se considerará el que arroje los valores más altos.

a) Caída de presión en el elemento N° 1 ( $h_1$ )

Las pérdidas en el elemento N° 1 es por expansión brusca del flujo de aire al ingresar a la caja de succión



Siendo  $V_0=1$  m/s, la velocidad en la sección 1,  $V_1$ , y en la sección 2,  $V_2$ , se hallan por continuidad, ecuación 5.3. Así tenemos .  $V_1=1.276$  m/s y  $V_2=0.263$  m/s

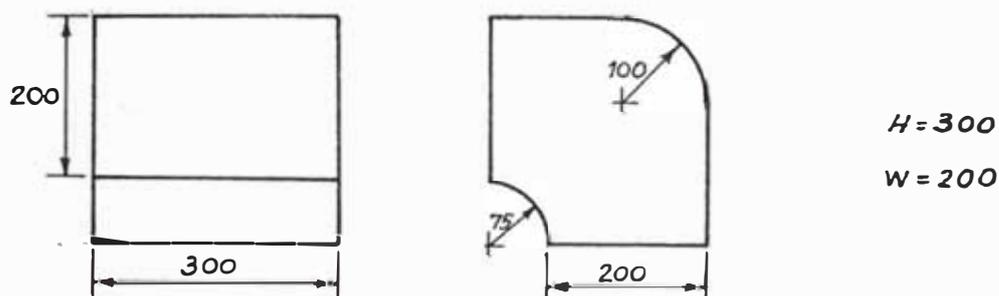
Para  $A_1/A_2=0.206$  de la figura 5.17 el coeficiente k por expansión brusca es :  $k_1=0.631$ , luego tendremos :

$$h_1 = k_1 \cdot f \cdot \frac{V_1^2}{2g} = 0.631 \cdot 1.182 \cdot \frac{1.276^2}{2 \cdot 9.8}$$

$$h_1 = 0.0619 \text{ mm.c.a}$$

b) Caída de presión en el elemento N° 2 ( $h_2$ )

El elemento N° 2 es un codo de 90°, cuyas dimensiones son las siguientes :



Según la ecuación 5.6, método de la longitud equivalente, se tiene :

$$h_2 = f \frac{L_e}{D_h} \frac{v^2}{2g}$$

Para  $R/W = 0.4$  y  $H/W = 1.5$ , de la figura 5.15 se obtiene :  $L_e/W = 101$

$$\text{Luego : } L_e = 101 W = 101 \times 200 = 20,200 \text{ mm}$$

$$L_e = 20.2 \text{ m}$$

El diámetro hidráulico es  $D_h = 4(H W)/2(H + W)$

$$D_h = 4(300 \times 200)/2(300 + 200) = 240 \text{ mm}$$

$$D_h = 0.24 \text{ m}$$

El factor de fricción  $f$  se obtiene del diagrama de Moody conociendo la rugosidad relativa  $\epsilon/D$  y el número de Reynolds  $Re$ .

Para fierro galvanizado la rugosidad absoluta  $\epsilon$  es 0.0001524 m.

$$\epsilon/D = 0.0001524/0.24 = 0.000635$$

$$\epsilon/D = 0.0006$$

Para  $T = 25^\circ\text{C}$  y  $\phi = 10\%$  se tiene :  $\rho = 1.182 \text{ kg/m}^3$ ;  
 $\mu = 1.875 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m s}$  . Luego para  $V = 1 \text{ m/s}$

$$\text{Re} = \frac{1.182 \cdot 1 \cdot 0.24}{1.875 \cdot 10^{-5}} = 15,130 \approx 1.5 \cdot 10^4$$

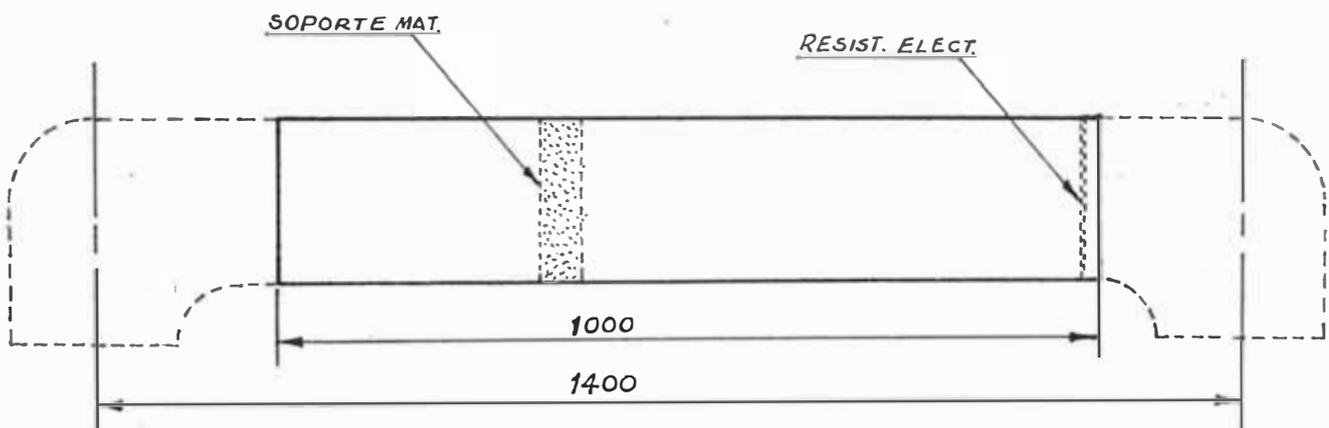
Del diagrama de Moody, para  $\epsilon/D = 0.0006$  y  
 $\text{Re} = 1.5 \cdot 10^4$  se obtiene :  $f = 0.029$  . Luego:

$$h_2 = 0.029 \frac{20.2}{0.24} 1.182 \frac{1^2}{2 \cdot 9.8} = 0.1471 \text{ mm.c.a}$$

$$h_2 = 0.1471 \text{ mm.c.a}$$

c) Caída de presión en el elemento N° 3 ( $h_3$ )

En el elemento N° 3 se ha de instalar la resistencia eléctrica y el elemento de soporte de material, tal como se aprecia en el siguiente esquema.



c.1 Pérdidas debido a la fricción con las paredes del ducto

Según la ecuación 5.4  $h_{f_3} = f \frac{L}{D_h} \rho \frac{V^2}{2g}$

La longitud de la pieza N° 3 es de 1,000 mm, pero por recomendaciones (referencia 2), la longitud a considerar en el cálculo de la caída de presión, es medida entre los puntos de intersección de la línea de centros de esta pieza con las líneas de centros de los ductos próximos, es decir :  $L = 1,400$  mm.

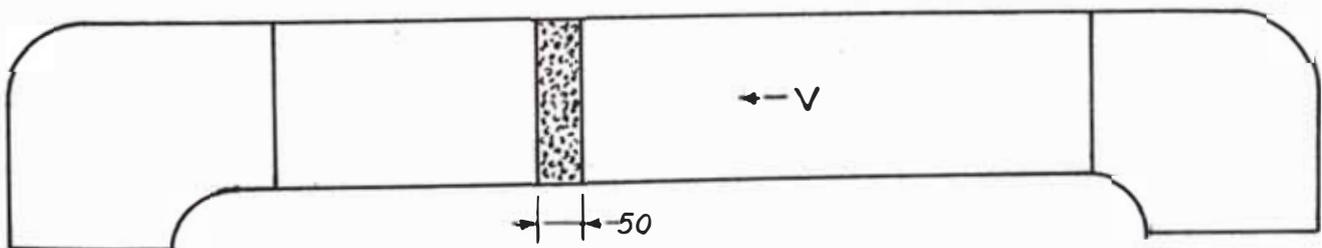
Se sigue considerando  $V = 1$  m/s;  $D_h = 240$  mm;  
 $\epsilon/D = 0.0006$ . Además para aire a  $T = 25$  °C y  $\phi = 10$  %  
se tiene  $Re = 1.5 \cdot 10^4$  y  $f = 0.029$

$$h_{f_3} = 0.029 \frac{1.4}{0.24} 1.182 \frac{1^2}{2 \cdot 9.8} = 0.0102 \text{ mm.c.a}$$

$$h_{f_3} = 0.0102 \text{ mm.c.a}$$

### c.2 Pérdidas al pasar el aire a través del producto

En el equipo se van a hacer ensayos con diversos tipos de productos, pero las pérdidas de presión son mayores cuando el material es menudo, caso de los lechos de granos. Por tal motivo, se va a calcular la pérdida de presión producida por granos de café contenidos en el elemento de soporte tipo paralelepípedo.



De la ecuación 5.7  $h_{\text{prod}} = 2 f' \frac{1 - E}{E^3} \frac{L}{d_e} f \frac{V^2}{2g}$

siendo :  $f' = \frac{160}{\text{Re}'} + \frac{3.1}{(\text{Re}')^{0.1}}$  y  $\text{Re}' = \frac{f V d_e}{\mu(1 - E)}$

Para el café los valores promedios de la porosidad y el diámetro equivalente son 0.36 y 0.8 cm, respectivamente.

Para aire a  $T = 25^\circ\text{C}$  y  $\phi = 10\%$ , tenemos :

$$\text{Re}' = \frac{1.182 \cdot 1 \cdot 0.008}{1.875 \cdot 10^{-5} (1 - 0.36)} = 788$$

$$f' = \frac{160}{788} + \frac{3.1}{(788)^{0.1}} = 1.794 ; \text{ por tanto :}$$

$$h_{\text{prod}} = 2 \cdot 1.794 \frac{1 - 0.36}{(0.36)^3} \frac{0.05}{0.008} 1.182 \frac{1^2}{2 \cdot 9.8}$$

$$h_{\text{prod}} = 18.5509 \text{ mm.c.a}$$

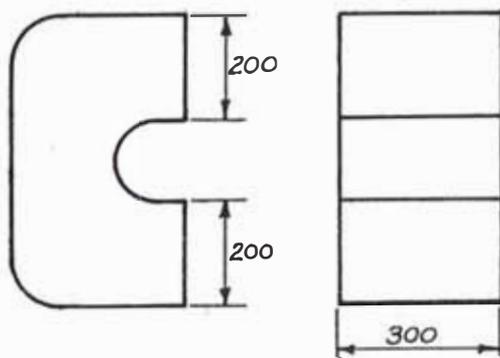
Luego :  $h_3 = h_{f_3} + h_{\text{prod}}$

$$h_3 = 0.0102 + 18.5509 = 18.5611 \text{ mm.c.a}$$

$$h_3 = 18.5611 \text{ mm.c.a}$$

d) Caída de presión en la pieza N° 4 ( $h_4$ )

El elemento N° 4 cambia la dirección del aire en  $180^\circ$ . Está formado por dos codos de  $90^\circ$  de dimensiones iguales a las del elemento N° 2.



De la figura 5.16 obtenemos el valor del coeficiente  $k$  para el elemento N° 4 . éste es :  $k = 1.5 k_{90^\circ}$

$k_{90^\circ} = 1.53$  se obtiene de la figura 5.15, luego :

$$k = 1.5 \cdot 1.53 = 2.295.$$

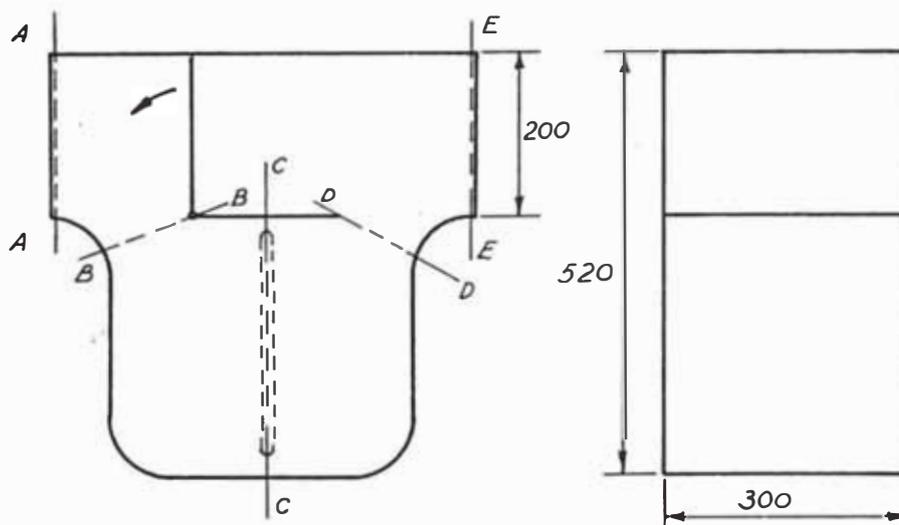
Considerando igual que en los casos anteriores el valor de la densidad del aire,  $\rho = 1.182 \text{ kg/m}^3$  tendremos:

$$h_4 = 2.295 \cdot 1.182 \frac{1^2}{2 \cdot 9.8} = 0.1384 \text{ mm.c.a}$$

$$h_4 = 0.1384 \text{ mm.c.a}$$

e) Caída de presión en el elemento N° 5 ( $h_5$ )

Evaluaremos la caída de presión en el elemento N° 5 para la posición más crítica de su compuerta, es decir la posición completamente abierta como se muestra en el esquema.

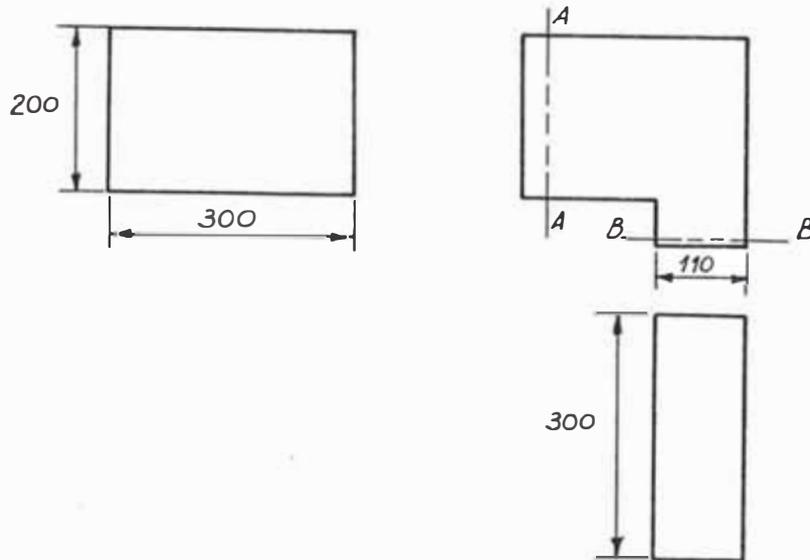


- La configuración de esta pieza es un tanto complicada, por lo que las pérdidas serán calculadas por tramos que serán asimilados a accesorios de forma simple, tratando en cada caso de situarse en la situación más desfa

vorable.

e.1 Pérdidas en el tramo A - B ( $h_{AB}$ )

El tramo A-B es asimilado a un codo, que en el caso más desfavorable tendría la siguiente forma :



En el tramo A-B hay pérdidas de presión por cambio de dirección y por cambio de sección. El coeficiente de pérdida por cambio de dirección se obtiene de la figura 5.15. El valor más crítico es para  $H/W = 2.7^{\wedge}$ , es decir  $k' = 1.53$ . El coeficiente de pérdida por cambio de sección es obtenido de la figura 5.17, su valor es  $k'' = 0.18$ .

Ambos coeficientes deben ser asociados a la mayor velocidad, es decir,  $V_B$ . Siendo  $V_A = 1$  m/s ; según la ecuación de continuidad 5.3 y considerando  $f_A = f_B$ , obtenemos  $V_B = 1.81$  m/s

$$\text{Por tanto : } h_{AB} = (1.53 + 0.18) f \frac{V_B^2}{2g}$$

$$h_{AB} = (1.53 + 0.18) \cdot 1.182 \frac{(1.81)^2}{2 \cdot 9.8} = 0.3378 \text{ mm.c.a}$$

$$h_{AB} = 0.3378 \text{ mm.c.a}$$

e.2 Pérdidas en el tramo B - C ( $h_{BC}$ )

El tramo B-C se asimila a un codo con cambio de dirección. Por cambio de dirección, considerando  $H/W = 2.7$ , de la figura 5.15 se obtiene  $k' = 1.53$ . Por cambio de sección, de la figura 5.17 se obtiene  $k'' = 0.438$

Ambos coeficientes son asociados con la mayor velocidad  $V_B$ . Del cálculo anterior  $V_B = 1.81 \text{ m/s}$

$$h_{BC} = (1.53 + 0.438) \cdot 1.182 \frac{(1.81)^2}{2 \cdot 9.8} = 0.3888 \text{ mm.c.a}$$

$$h_{BC} = 0.3888 \text{ mm.c.a}$$

e.3 Pérdidas en el tramo C - D ( $h_{CD}$ )

Situándonos en el caso más crítico, la configuración de este tramo es la de un codo con cambio de sección similar al del tramo B-C. Considerando  $H/W = 2.7$  y los coeficientes de pérdidas asociados a la mayor velocidad  $V_D = V_B$ , la pérdida de presión es igual que en el tramo B-C. Por tanto :  $h_{CD} = 0.3888 \text{ mm.c.a}$

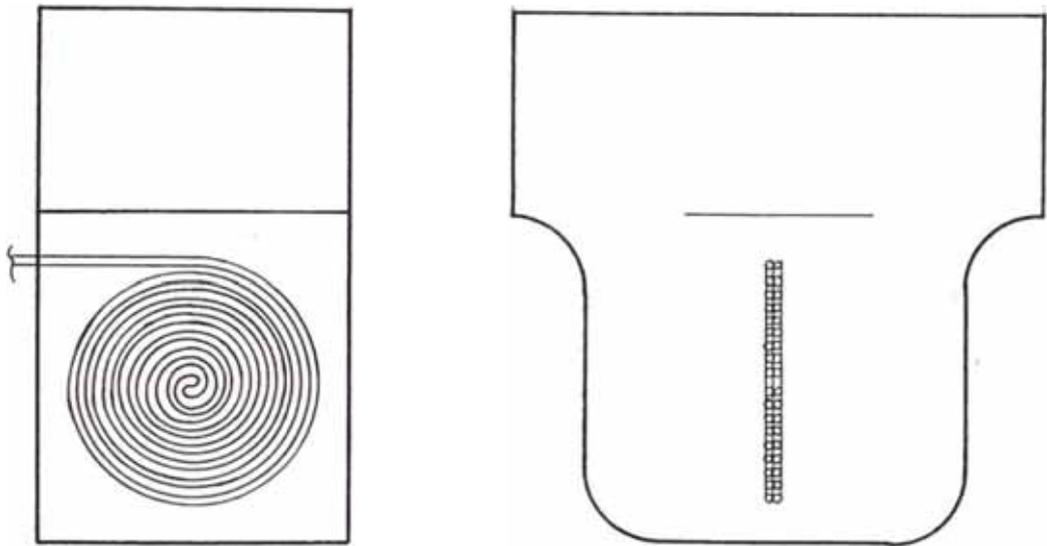
$$h_{CD} = 0.3888 \text{ mm.c.a}$$

e.4 Pérdidas en el tramo D - E ( $h_{DE}$ )

La configuración más crítica para este tramo es la de un codo similar al del tramo A-B.

Por tanto :  $h_{DE} = 0.3378 \text{ mm.c.a}$

e.5 Pérdida de presión en el serpentín del deshumecedor ( $h_{serp}$ )



El serpentín está formado por dos hileras, longitudinales, que tienen la forma de una espiral y lo vamos a considerar como anillos concéntricos.

La fórmula 5.9 nos da una aproximación de la caída de presión a través del serpentín. Para efectos de cálculo consideremos que el diámetro interno de los anillos más pequeños (diámetro menor de la espiral) es igual a  $c = 1/4''$ . En la configuración asumida se tendrá 9 anillos concéntricos, siendo el diámetro externo de los anillos más grandes igual a 0.25 m.

Tendremos entonces 2 hileras longitudinales y 18

hileras transversales a la dirección del flujo.

De la ecuación 5.9 , la caída de presión en el serpentín es :

$$\Delta p = \frac{f (G_{\text{máx}})^2 N (\mu_s)^n}{\rho_b (2.09 \cdot 10^8) (\mu_b)}$$

Haremos la evaluación de la caída de presión en el serpentín, considerando que la temperatura de mezcla de la masa fluida  $T_b$  es  $25^\circ\text{C}$  y la temperatura de la superficie de los tubos  $T_s$  es  $0^\circ\text{C}$ . Estas suposiciones se hacen solo con la finalidad de simplificar los cálculos, haciendo la observación que para calcular  $T_b$  es necesario conocer el flujo de refrigerante en el serpentín, dato que no es conocido.

$$\text{Así : } T_b = 25^\circ\text{C} \quad (77^\circ\text{F})$$

$$T_s = 0^\circ\text{C} \quad (32^\circ\text{F})$$

Velocidad  $V_1$

Por continuidad hallamos  $V_1 = 0.625 \text{ m/s}$

Flujo de masa de aire ( $\dot{m}$ )

$$\dot{m} = \rho_b V A = 1.182 \cdot 0.625 \cdot 0.30 \cdot 0.32 = 0.07092 \text{ kg/s}$$

Area mínima de paso del fluido ( $A_T$ )

$A_T$ , es igual al área de los espacios libres transversales al flujo de aire. Realizando los cálculos se obtuvo :  $A_T : 0.06856 \text{ m}^2 \quad (0.738 \text{ pie}^2)$

Velocidad de la masa fluida ( $G_{\text{máx}}$ )

$$G_{\text{máx}} = \frac{\dot{m}}{A_T} = \frac{0.07092}{0.06856} = 1.034422 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

$$G_{\text{máx}} = 1.0344 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad (761.12 \text{ lb/hr pie}^2)$$

Número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{G_{\text{máx}} D_o}{\mu_f} ; \text{ la temperatura de película } T_f \text{ es igual}$$

$$\text{a } T_f = \frac{T_s + T_b}{2} = 12.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (54.5 \text{ }^\circ\text{F})$$

$$\mu_f = 4.296 \cdot 10^{-2} \text{ lb/pie hr}$$

$$Re = \frac{761.12 (5/16)/12}{4.296 \cdot 10^{-2}} = 461, \text{ por tanto el flujo es la}$$

minar y el exponente n toma el valor de 0.25

Factor de rozamiento (f)

El coeficiente f es obtenido de la figura 5.18 ,  
de esta figura para  $Re = 461$  ,  $f = 0.175$

$$\Delta p = \frac{0.175 (761.12)^2 18}{0.0737 (2.09 \cdot 10^8)} \frac{1.151 \cdot 10^{-5}}{1.235 \cdot 10^{-5}}^{0.25} = 0.1164 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$$

$$h_{\text{serp}} = 0.56942 \text{ mm.c.a}$$

La caída de presión en la pieza N° 5 será :

$$h_5 = h_{AB} + h_{BC} + h_{CD} + h_{DE} + h_{\text{serp}}$$

$$h_5 = 0.3378 + 0.3888 + 0.3888 + 0.3378 + 0.5694$$

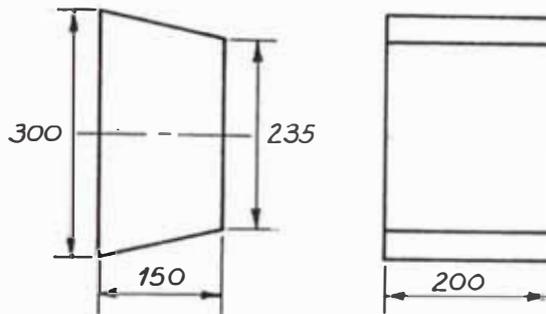
$$h_5 = 2.0226 \text{ mm.c.a}$$

f) Caída de presión en el elemento N° 6

La pérdida de presión en el elemento N° 6 es ori-  
ginado por contracción gradual del ducto. El coefi-  
ciente de resistencia k es referido a la mayor velo-  
cidad del aire en el elemento. Por continuidad halla-  
mos  $V_2 = 1.276 \text{ m/s}$  y de la figura 5.17 obtenemos el

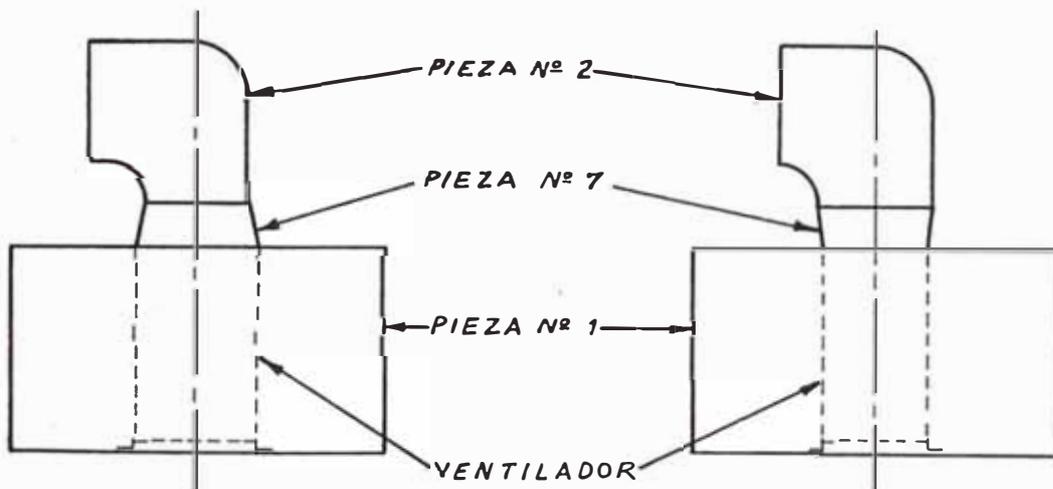
valor  $k_2 = 0.0126$ . Entonces para  $\rho = 1.182 \text{ kg/m}^3$  tendremos :

$$h_6 = 0.0126 \frac{(1.276)^2}{2 \times 9.8} = 0.00123 \text{ mm.c.a}$$



$$h_6 = 0.00123 \text{ mm.c.a}$$

g) Caída de presión en el elemento N° 7



El elemento N° 7 conecta el ventilador con el elemento N° 2. Sus dimensiones van a ser determinadas en base al ventilador que se seleccione y en consecuencia puede ocasionar pérdidas por contracción o expansión gradual.

Como una aproximación, podemos asumir que estas pérdidas son iguales a las del elemento N° 6, dado

que la configuración de ambas piezas son bastante parecidas.

$$\text{Entonces : } h_7 = 0.00123 \text{ mm.c.a}$$

Finalmente se tiene que la caída de presión a través del sistema  $h_{\text{sist}}$  es .

$$h_{\text{sist}} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7$$

$$h_{\text{sist}} = 0.0619 + 0.1417 + 18.5611 + 0.1384 + 2.0226 + 0.0012 + 0.0012 = 20.8885 \text{ mm.c.a}$$

$$h_{\text{sist}} = 20.8885 \text{ mm.c.a}$$

En la tabla 5.2, se tabulan los valores de caída de presión total y estática de los componentes del sistema.

### 5.4.3 Selección del ventilador

#### 5.4.3.1 Clasificación y características de los ventiladores

Como primer paso hacia la selección del ventilador se menciona la clasificación y características de los ventiladores.

Según la dirección del flujo, los ventiladores son clasificados en dos clases generales: De flujo axial y centrífugos.

a) Ventiladores de flujo axial Estos ventiladores mueven al aire paralelamente a su eje y en ángulo recto al campo de rotación de los álabes.

En sistemas de secado, dos tipos de estos ventiladores son bastante usados : Ventiladores axiales con estator y sin estator. Ambos tipos tienen rodete de flujo axial que usualmente son montados directamente al eje del motor. Los motores son montados dentro de un cilindro que sirve como soporte del motor y ventilador.

El ventilador axial con estator tiene un difusor de aletas (aletas guías) que actúa como alineador de flujo y reduce las pérdidas de energía por la turbulencia o producidas al dejar el aire los álabes.

Las siguientes son las especificaciones de algunos tipos de ventiladores axiales, pudiéndose encontrar ventiladores axiales que producen una presión estática de hasta  $1492 \text{ N/m}^2$  (6" agua).

Ventiladores axiales.	C.C - C.A	
	desde	hasta
diámetro del rotor; mm	100	200
caudal entregado; $\text{m}^3/\text{h}$	90	400
CFM	53	235
presión creada; $\text{N/m}^2$	30	100
pulg agua	0.12	0.40
potencia; W	10	40

Ventiladores axiales. C.A

	desde	hasta
diámetro del rotor; mm	200	400
caudal entregado; m <sup>3</sup> /h	450	1400
CFM	265	824
presión creada; N/m <sup>2</sup>	10	60
pulg agua	0.04	0.24
potencia; W	35	90

Ventiladores. C.A

	desde	hasta
diámetro del rotor; mm	250	500
caudal entregado; m <sup>3</sup> /h	1,000	10,000
CFM	588	5800
presión creada; N/m <sup>2</sup>	30	100
pulg agua	0.12	0.40

b) Ventiladores centrífugos Son llamados así porque parte de la energía usada para producir presión es creada por acción centrífuga. El aire entra al ventilador paralelamente al eje, lo mueve radialmente a través de los álabes y es descargado tangencialmente del difusor espiral que rodea al impulsor. La disposición de álabes para ventiladores centrífugos comunmente usados en el secado de cosechas es curvado hacia atrás o curvado hacia adelante.

El rotor de un típico ventilador con álabes curvados hacia atrás, es robusto y los álabes son normalmente profundos, es decir, la razón del diámetro de entrada al diámetro de salida es pequeña. El rotor de

un ventilador de álabes curvados hacia adelante es comunmente construido de material ligero y los álabes son relativamente cortos o sea, la razón de diámetro de entrada y diámetro de salida es grande.

Los ventiladores centrífugos pueden producir una presión de hasta  $15,000 \text{ N/m}^2$  (60 pulg agua). En operaciones de secado, normalmente se opera en un rango de presiones de 0 a  $1,492 \text{ N/m}^2$  (0 a 6 pulg agua), con ventiladores de álabes curvados hacia adelante y en un rango de 0 a  $2,983 \text{ N/m}^2$  (0 a 12 pulg agua) con ventiladores de álabes curvados hacia atrás.

#### Ventiladores centrífugos

	desde	hasta
caudal entregado; $\text{m}^3/\text{h}$	500	50,000
CFM	294	29,430
presión creada; $\text{N/m}^2$	100	15,000
pulg agua	4	60

El ventilador ha de ser seleccionado de acuerdo a los datos de operación del secador, siendo la prime consideración el requerimiento de aire del sistema.

Otras de las características que podrían ser tomadas en cuenta se enuncian a continuación, considerando los tres tipos de ventiladores citados anteriormente.

- Ventiladores de flujo axial (con estator y sin estator)

- a. El ventilador y el motor pueden instalarse dentro del ducto.
- b. El tubo de soporte del motor - ventilador, puede conectarse con facilidad a un sistema de ductos circulares.
- c. El costo de estos ventiladores es menor que el de los centrífugos.
- d. No tiene características de sobrecarga.
- e. Tiene un nivel de ruido más alto que los ventiladores centrífugos.
- f. El ventilador puede conectarse directamente al eje del motor, evitando el uso de fajas.
- g. Operan normalmente en un rango de presión de bajo a moderado, 0 a  $1,500 \text{ N/m}^2$  (0 a 6 pulg agua)
- h. Tiene una región de operación inestable.

- Ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás

- a. Difícil montaje en ductos circulares
- b. Su costo es más alto que el de los ventiladores axiales
- c. No tiene características de sobrecarga
- d. Se requiere del uso de fajas de impulsión
- e. Opera normalmente a relativamente altas presiones de 0 hasta  $2,983 \text{ N/m}^2$  (12 pulg agua)
- f. No tiene región de operación inestable
- g. Su construcción es robusta

- Ventilador centrífugo de álabes curvados hacia adelante.

- a. Difícil montaje en ductos circulares.
- b. Tiene características de sobrecarga.
- c. Se requiere del uso de fajas de impulsión.
- d. Su nivel de ruido es más bajo que el de los otros ventiladores.
- e. No tiene rango de operación inestable.
- f. Usualmente es de construcción liviana.
- g. Normalmente opera en un rango de presión de moderado a bajo, 0 a  $1,492 \text{ N/m}^2$  (6 pulg agua).

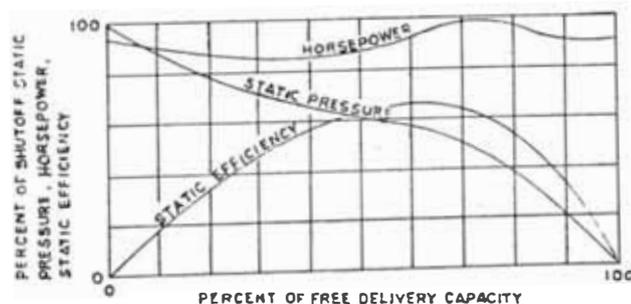
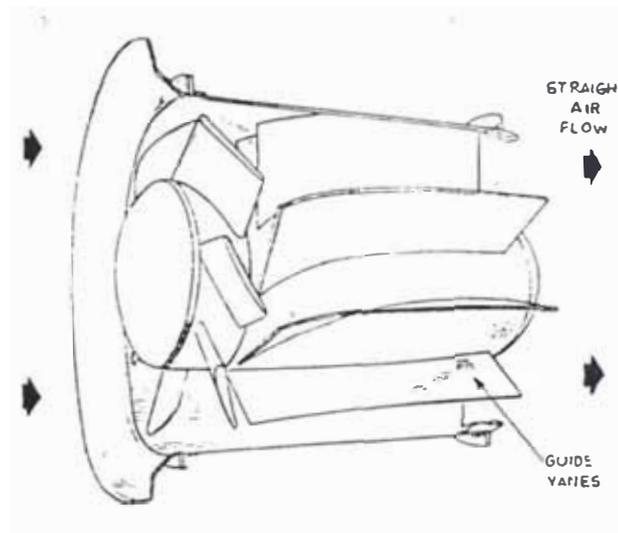


Figura 5.20 Rotor y curvas típicas de un ventilador axial

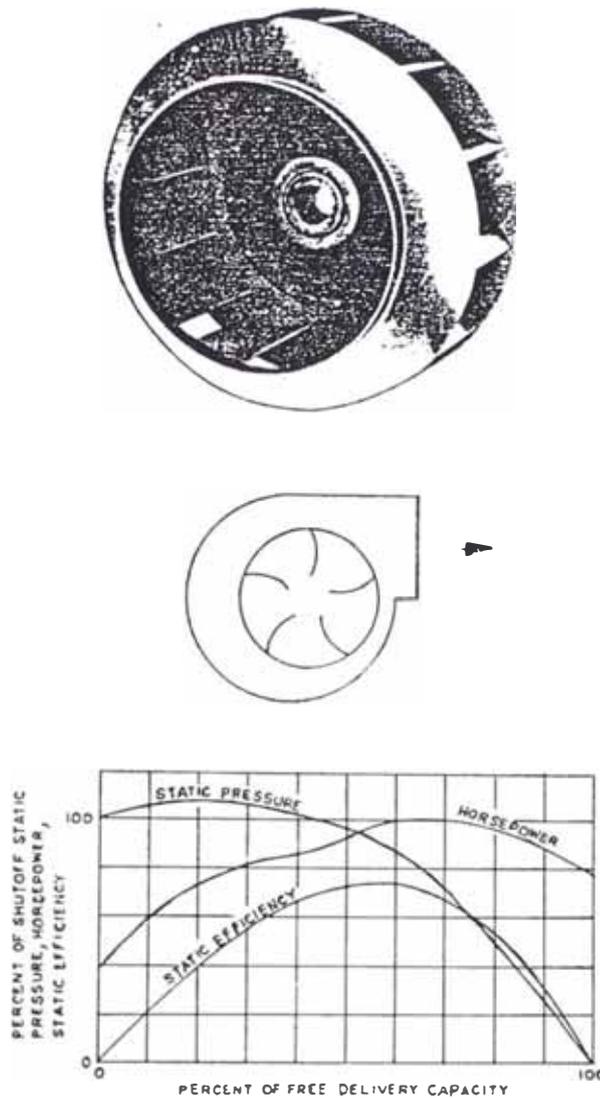


Figura 5.21 Rotor y curvas típicas de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás  
Fuente : Ref. bibliográfica N° 4

#### 5.4.3.2 Requerimientos del sistema

a) Presión estática (PS) De la tabla 5.2, obtenemos el valor de 20.7952 mm.c.a de caída de presión estática en el sistema para la velocidad  $V_0 = 1$  m/s.

Por tanto el ventilador seleccionado debe ser capaz de crear una presión estática de :

$$PS = 20.79 \text{ mm.c.a (0.818 pulg agua)}$$

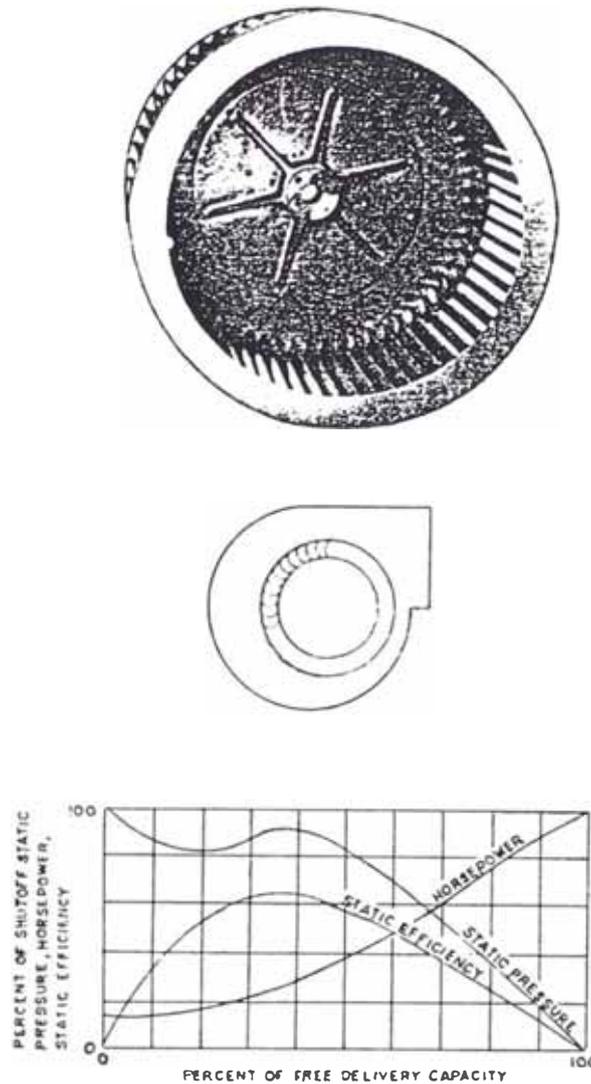


Figura 5.22 Rotor y curvas típicas de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia adelante. Fuente : Ref. Bibliográfica Nº 4.

b) Flujo volumétrico de aire ( $\dot{V}$ ) El flujo volumétrico de aire lo calcularemos de tres formas diferentes, de tal manera que se satisfagan todas las consideraciones de diseño.

- b.1. Satisfaciendo la velocidad del aire requerida en la cámara de secado.
- b.2. Atendiendo las características o propiedades de los materiales a secar.

b.3. Atendiendo el balance térmico en la cámara de secado.

b.1. Flujo volumétrico de aire para satisfacer la velocidad de aire requerida en la cámara de secado

De acuerdo a las consideraciones de diseño, la velocidad del aire en la cámara de secado  $V_o$ , debe ser de hasta 1 m/s.

Siendo la sección transversal del ducto en la cámara de secado de  $0.2 \times 0.3 = 0.06 \text{ m}^2$ , se tiene que :

$$\dot{V} = V_o \times A = 1 \text{ m/s} \times 0.06 \text{ m}^2 = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$\dot{V} = 0.06 \text{ m}^3/\text{s} \quad (127 \text{ CFM})$$

b.2. Flujo volumétrico de aire, atendiendo las características de los materiales a secar

En los cálculos siguientes se toma en cuenta el contenido de humedad inicial y final del producto.

Los rangos de contenido de humedad base húmeda de los productos que usualmente se secan son :

$$M_i = 0.20 - 0.85$$

$$M_f = 0.04 - 0.24$$

Situándonos en el caso más crítico, se supone un material ideal de las siguientes características :

$$M_i = 0.85$$

$$M_f = 0.05$$

De la ecuación 3.8, el contenido de humedad base seca es :

$$X_p = \frac{M}{1-M} ; \text{ luego : } X_{p,i} = 5.6666$$
$$X_{p,f} = 0.0526$$

Además, si consideramos que :

masa de producto húmedo :  $m_p = 2 \text{ kg}$

tiempo de secado :  $\theta = 10 \text{ hr}$

Entonces, efectuamos cálculos aproximados según referencia bibliográfica N° 10 :

- Razón de secado ( $\dot{m}_p$ )

$$\dot{m}_p = \frac{m_p}{\theta} = \frac{2 \text{ kg}}{10 \text{ hr}} = 0.2 \text{ kg mat. húm./hr}$$

- Razón de secado con referencia al sólido seco contenido en el material ( $\dot{m}_s$ )

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p (1 - M_i) = 0.2 \text{ kg } \frac{\text{mat. húm.}}{\text{hora}} (1 - 0.85) \frac{\text{kg mat. seca}}{\text{kg mat. húm.}}$$

$$\dot{m}_s = 0.03 \text{ kg mat. seca/hr}$$

- Flujo de agua a evaporar ( $\dot{m}_w$ )

$$\dot{m}_w = \dot{m}_s (X_{p,i} - X_{p,f})$$

$$\dot{m}_w = 0.03 \frac{\text{kg mat. seca}}{\text{hr}} (5.6666 - 0.0526) \frac{\text{kg agua}}{\text{kg mat. seca}}$$

$$\dot{m}_w = 0.16842 \text{ kg agua/hr}$$

Al iniciarse el calentamiento sensible del aire, punto 1 en la figura 5.23, las condiciones del aire son aproximadamente iguales a las del medio ambiente, es decir la temperatura y humedad del medio ambiente dentro del laboratorio.

Según mediciones realizadas los valores promedios son :

$$t_1 : 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\phi_1 : 60 \%$$

$$H_1 : 0.011803 \text{ (según ecuac.2.9; para pt aire:1" )}$$

De 1 a 2 se efectúa el calentamiento sensible del aire, de la carta psicrométrica obtenemos :

$$t_2 : 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\phi_2 : 4 \%$$

$$H_2 : 0.011803$$

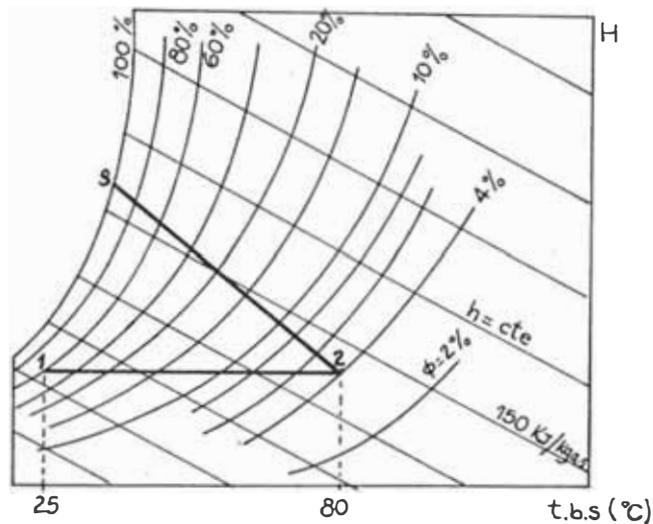


Figura 5.23 Calentamiento sensible del aire y trayectoria del proceso de secado

Debido a que el producto recibe calor por convección forzada del flujo de aire y por radiación desde las paredes de la cámara de secado, el aire en el proceso de secado sigue la trayectoria 2-S<sup>(1)</sup>. Ver figura 5.23.

o el secado se realiza con aire a baja temperatura, la rec<sub>2-S</sub> coincide con la línea de entalpía constante.

La temperatura de la superficie del producto que se está secando es la temperatura de saturación  $t_s$  y se obtiene gráficamente modificando la ecuación 2.23 de la siguiente manera :

$$H_s - H_2 = \frac{U c_p}{h_c \lambda_s} (t_2 - t_s)$$

Donde :  $U = h_c + h_r$  , es el coeficiente total de transmisión de calor

$c_p$  : calor específico del aire húmedo

$h_c$  : coeficiente de transmisión de calor por convección

$h_r$  : coeficiente de transmisión de calor por radiación

$\lambda_s$  : calor latente de vaporización del agua a la temperatura de superficie del material

Las condiciones del aire al salir de la cámara de secado están ubicadas en un punto de la recta 2-S, por lo tanto conociendo la temperatura puede determinarse con facilidad la humedad del aire y viceversa.

La humedad relativa del aire al salir de la cámara de secado  $\phi_3$  debe ser alta para tener un proceso de secado eficiente, pero, a la vez debe ser lo suficientemente baja como para asegurar que no se producirá humedecimiento del material situado en los tramos finales de su recorrido.

El valor de  $\phi_3$  depende del flujo de aire en la cámara de secado y de la cantidad de material húmedo a

secar.

Para calcular el flujo de aire necesario para obtener un determinado valor de  $\phi_3$ , se asume el valor de  $\phi_3$  menor o igual a la humedad relativa de equilibrio correspondiente al contenido final de humedad del material.

Como en el banco experimental se deben establecer diversas condiciones del aire de secado, el proceso no siempre va a ser eficiente y más importante que tener un óptimo valor de  $\phi_3$  va a ser conseguir los parámetros de ensayo requeridos en la cámara de secado.

Por tanto, el cálculo que se realiza a continuación no contempla el valor óptimo de  $\phi_3$ , sino el valor de  $t_3$  para un flujo dado (1).

- Coeficiente de transmisión de calor por convección ( $h_c$ )

Considerando  $V_o = 1 \text{ m/s}$ , se tiene :

$$G = f_2 \cdot V_o = 0.992 \cdot 1 \cdot 3600 = 3571.2 \text{ kg/hr m}^2$$

Usando la ecuación 6.12, obtenemos valores aceptables para nuestro caso. Ver otras ecuaciones en apéndice D.1

$$h_c = 1.163 (3571.2)^{0.37} = 23.995 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) En el apéndice F.1 se realiza el cálculo del flujo de aire para obtener un proceso de secado eficiente.

- Coeficiente de transmisión de calor por radiación ( $h_r$ )

Considerando :  $t_{\text{paredes camara de secado}} : 80 \text{ } ^\circ\text{C}$

superficie producto :  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$

De la figura 5.24 obtenemos<sup>(1)</sup>:

$$h_r = 7.2932 \text{ kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} - 8.4819 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

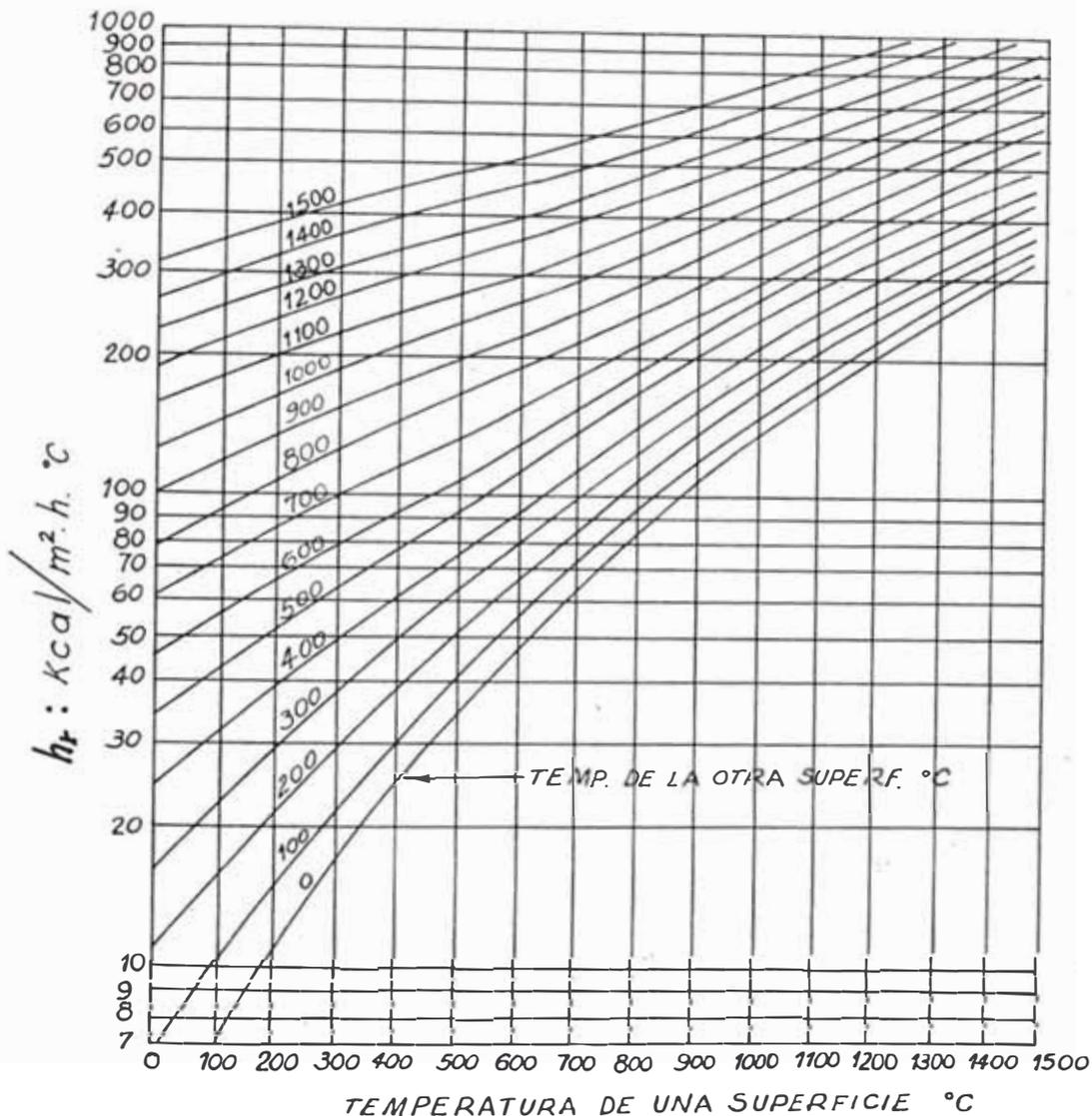


Figura 5.24 Coeficiente de transmisión de calor  $h_r$

1) Se ha considerado la emisividad igual a la unidad, los resultados tienen aproximación suficiente en la práctica. Según referencia 22 capítulo 7. Ver apéndice F.2

- Coeficiente total de transmisión de calor (U)

$$U = h_c + h_r = 23.995 + 8.4819 = 32.4769 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U = 32.4769 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Calor específico del aire húmedo ( $c_{p m}$ )

De la ecuación 2.20.a tenemos :

$$c_{p m} = 1.004 + 1.84(H_2) = 1.004 + 1.84(0.011803)$$

$$c_{p m} = 1.0257 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$$

- Calor latente de vaporización del agua a la temperatura de superficie del material ( $\lambda_s$ )

A la temperatura  $t_s = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , de las tablas de propiedades termodinámicas del agua del apéndice A se tiene

$$\lambda_s = 2405.777 \text{ kJ/kg}$$

Luego tendremos :

$$\frac{U c_p}{h_c \lambda_s} = \frac{32.4769 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 1.0257 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}}{23.995 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 2405.777 \text{ kJ/kg}} = 0.000577057$$

Por tanto :

$$H_s - 0.011803 = 0.0005770(80 - t_s)$$

El valor de  $t_s$  se obtiene graficando esta última ecuac. en la carta psicrométrica ayudándonos de un punto auxiliar B ( $t=50^\circ\text{C}$ ;  $H=0.029$ ); ver figura 5.25 o reemplazando  $H_s$  en función de  $\phi$ ,  $t_s$ ,  $p_s$ , en este caso se busca  $t_s$  para el cual  $\phi = 100 \%$ .

El valor de  $t_s$  obtenido es :  $t_s = 35.4 \text{ }^\circ\text{C}$

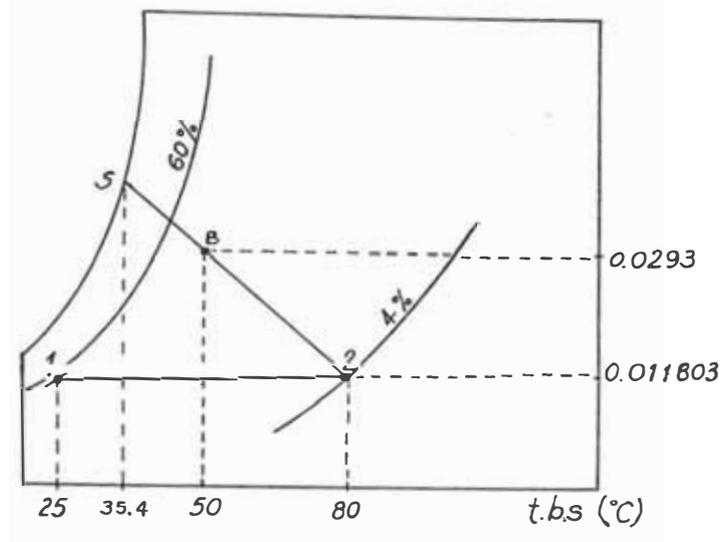


Figura 5.25 Determinación gráfica de la temperatura de superficie del cuerpo húmedo.

Temperatura del aire al salir de la cámara de secado ( $t_{sal}$ )

La ecuación para hallar la temperatura del aire al salir de la cámara de secado se desarrolla en el apéndice D.3; dicha ecuación es la siguiente :

$$t_{sal} = t_s + (80 - t_s) e^{-NUT \Delta x/L} \dots (5.11)$$

Donde :  $t_s$  : temperatura de la superficie del cuerpo que se está secando

NUT: número de unidades de transferencia

$\Delta x$  : segmento de lecho en el que se aplica la ecuación

L : longitud del lecho

Como en nuestro caso la longitud del lecho es pequeña (5 cm), la división del lecho en segmentos no tiene mayor influencia en el resultado de la tempera-

tura de salida, por tanto, se hace  $\Delta x = L$ .

Debido a que las ecuaciones para obtener los valores de NUT,  $\dot{m}_a$  y  $t_{\text{salida}} = t_3$ , están relacionadas entre sí, construimos un cuadro donde partiendo de un valor  $t_3'$  se obtiene un valor  $t_3''$ . La solución es el valor para el cual  $t_3' - t_3'' \approx 0$ .

Las ecuaciones para tabular el cuadro son las siguientes :

$$H_s - 0.011803 = 0.0005770 (80 - t_s)$$

Reemplazando  $H_s = H_3$

$$H_3 = 0.621 \frac{\phi_3 \cdot p_{s3}}{p_t - \phi_3 \cdot p_{s3}}$$

$$\phi = (0.057963 - 0.000577 t_s) p_t / (0.678963 - 0.000577 t_s) p_s$$

$$H_3 = 0.621 \phi_3 \cdot p_{s3} / (1.035535 - \phi_3 \cdot p_{s3})$$

$$c_{p m} = 1.004 + 1.84 H$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_w / (H_3 - 0.011803)$$

$$\dot{m}_a = 0.16842 / (H_3 - 0.011803) 3600$$

$$NUT = 0.0324769 \times 0.06 / \dot{m}_a \cdot c_{p m}$$

$$t_3 = 35.4 + (80 - 35.4) e^{-NUT}$$

A continuación se construye una tabla en la cual se puede apreciar el procedimiento para hallar  $t_3$ .

$t'_3$ °C	$p_{s3}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\phi_3$ %	$H_3$ $\frac{\text{kg ag.}}{\text{kg a.s}}$	$c_{p m}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg/°C}}$	$\dot{m}_a$ kg/s	NUT	$t''_3$ °C	$t'_3 - t''_3$
75	0.3931	6.0866	0.0146	1.0310	0.0162	0.1165	75.09	-0.09
76	0.4110	5.5971	0.0141	1.0299	0.0202	0.0933	76.02	-0.02
76.5	0.4200	5.3679	0.0138	1.0294	0.0231	0.0817	76.500	0
77	0.4290	5.1482	0.0135	1.0289	0.0270	0.0700	76.98	+0.02

De la tabla anterior tenemos :

$$t_{\text{sal}} = t_3 = 76.5 \text{ °C} \quad (\phi_3 = 5.36\% , H_3 = 0.01382)$$

- Flujo másico de aire ( $\dot{m}_a$ )

$$\dot{m}_a = 0.02316 \text{ kg/s}$$

- Flujo volumétrico de aire ( $\dot{V}$ )

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_a}{\rho}$$

Considerando la densidad del aire a condiciones medias de entrada y salida de la cámara de secado, es decir,  $t = 78^\circ\text{C}$  ,  $\phi = 4.91\%$ ; de la ecuación 2.26 obtenemos :  $\rho = 1.00725 \text{ kg/m}^3$ .

Entonces tendremos :

$$\dot{V} = \frac{0.02316 \text{ kg/s}}{1.00725 \text{ kg/m}^3}$$

$$\dot{V} = 0.02299 \text{ m}^3/\text{s} \quad (48.73 \text{ CFM})$$

b.3. Flujo volumétrico de aire, según el balance térmico en la cámara de secado

El aire de secado se encuentra inicialmente a

25 °C, luego va aumentando de temperatura (al pasar por la resistencia eléctrica que se halla encendida), hasta alcanzar la temperatura de 80 °C (que es la máxima temperatura asumida para los cálculos). Entonces, el aire a esta temperatura, al pasar por el producto hace incrementar la temperatura de su superficie hasta que alcanza el valor de 35.4 °C. Ver figura 5.25.

En estas condiciones podemos establecer el siguiente balance térmico :

(Energía que cede el aire) = (Energía para elevar la temperatura del producto hasta 35.4 °C) + (Energía necesaria para evaporar el agua del producto)

Es decir :

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_{cal} + \dot{Q}_{evap} \dots\dots\dots(5.12)$$

- Flujo de calor entregado por el aire para incrementar la temperatura del producto ( $\dot{Q}_{cal}$ )

$$\dot{Q}_{cal} = \dot{m}_p c_{p p} (t_s - t_1) \quad (5.13)$$

Donde :  $\dot{m}_p$  : razón de secado; kg mat.húm./hr

$c_{p p}$  : calor específico del producto;  $\frac{kcal}{kg-^{\circ}C}$

Del cálculo realizado en b.2, se tiene que la razón de secado es  $\dot{m}_p = 0.2$  kg mat.húm./hr. Las temperaturas  $t_s$  y  $t_1$  se obtienen de la figura 5.25, los

valores son :  $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $t_s = 35.4 \text{ }^\circ\text{C}$

El calor específico del producto es tomado de los resultados experimentales de Rossi y Roa - 1979, referencia 19 página 137<sup>(1)</sup>. Ver anexo E.2

$$c_{p p} = 0.996 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$$

Entonces tendremos que :

$$\dot{Q}_{\text{cal}} = 0.2 \text{ kg mat.húm/hr} \times 0.996 \frac{\text{kcal}}{\text{kg }^\circ\text{C}} (35.4 - 25)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{cal}} = 2.0716 \text{ kcal/hr} \quad (2.409 \text{ W})$$

- Flujo de calor necesario para evaporar el agua del producto ( $\dot{Q}_{\text{evap}}$ )

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m}_w \lambda_p \dots\dots\dots(5.14)$$

Donde :  $\dot{m}_w$  : masa de agua a evaporar; kg/s

$\lambda_p$  : calor latente de vaporización de agua del producto; kcal/kg

El calor latente de vaporización de agua del producto<sup>(2)</sup> es tomado de la referencia 19 página 6 para un producto de contenido de humedad inicial base húmeda de 80 a 90%. Dicho valor<sup>(3)</sup> es 580 kcal/kg

- 1) Se obtiene aproximadamente del anexo E.2 para un contenido de humedad base húmeda del producto de 85%.
- 2) Valor obtenido por Hall - 1957
- 3) Ver en tabla anexo E.1 el calor latente de vaporización de agua en algunos productos agrícolas.

De los cálculos realizados en b.2, se tiene :

$$\dot{m}_w = 0.16842 \text{ kg agua/hr, luego tenemos :}$$

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = 0.16842 \text{ kg agua/hr} \cdot 580 \text{ kcal/kg}$$

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = 97.6836 \text{ kcal/hr} \quad (113.606 \text{ W})$$

Por tanto :

$$\dot{Q}_a = 2.409 + 113.606 = 116.015 \text{ W}$$

- Flujo másico de aire ( $\dot{m}_a$ )

El flujo másico de aire necesario para entregar la energía térmica  $\dot{Q}_a$ , se halla de la relación :

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \cdot c_{p m} \cdot \Delta t_a \quad \dots\dots\dots(5.15)$$

En la cual,  $c_{p m}$  : calor específico del aire húmedo

$$\Delta t_a : t_2 - t_3$$

El valor de  $c_{p m}$  lo evaluamos a condiciones medias de los puntos 2 y 3, es decir,  $t=78^\circ\text{C}$ ,  $\phi=4.91\%$  a estas condiciones de la ecuación 2.20.a tenemos

$$c_{p m} = 1.02876 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = \frac{0.116015 \text{ kW}}{1.02876 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \cdot (80 - 76.5)^\circ\text{C}} = 0.0322203 \text{ kg/s}$$

- Flujo volumétrico de aire (V)

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

Considerando la densidad del aire igual que en b.2, tenemos :

$$\dot{V} = \frac{0.03222 \text{ kg/s}}{1.00725 \text{ kg/m}^3} = 0.0319884 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V} = 0.03198 \text{ m}^3/\text{s} \quad (67.77 \text{ CFM})$$

De los resultados obtenidos en b.1, b.2 y b.3, se deduce que el valor de  $V_{aire} = 1 \text{ m/s}$  adoptado, es correcto pues el flujo volumétrico en este caso (127 CFM), es suficiente para satisfacer requerimientos de secado según características del material a secar y balance térmico en la cámara de secado.

Por tanto, el flujo volumétrico de aire requerido en el banco experimental de secado es :

$$\dot{V} = 0.06 \text{ m}^3/\text{s} \quad (127 \text{ CFM})$$

#### 5.4.3.3 Potencia de accionamiento del ventilador (Pot)

$$\text{Pot} = \frac{\dot{V} h_{\text{sist}}}{\eta} 9.8 \dots\dots\dots(5.16)$$

Donde : Pot : Potencia requerida para accionar el ventilador; W

$h_{\text{sist}}$  :caída de presión total; mm.c.a.

$\eta$  :eficiencia del ventilador y la transmisión juntas; decimal

Reemplazando los valores de  $\dot{V}$  y  $h_{\text{sist}}$  para la velocidad  $V_0 = 1 \text{ m.s}$  y asumiendo el valor  $\eta = 0.25$  tenemos :

$$\text{Pot} = \frac{0.06 \text{ m}^3/\text{s} \times 20.9336 \text{ mm.c.a}}{0.25} 9.8 = 49.235 \text{ W}$$

$$\text{Pot} = 50 \text{ W} \quad (0.06 \text{ HP})$$

#### 5.4.3.4 Tipo de ventilador a usar

El caudal de aire requerido en el sistema es pequeño,  $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$  (127 CFM) y la presión estática que debe proporcionar el ventilador es de un valor moderado, 20.7952 mm.c.a (0.818 " agua).

De acuerdo a las características de los ventiladores, los de flujo axial operan en un rango de bajos valores de presión y proporcionan grandes flujos de aire, mientras que los centrífugos lo hacen en un rango de presiones más altas, transportando aire en bajas o moderadas cantidades. Esto hace descartar la posibilidad de uso del ventilador axial, escogiéndose el ventilador centrífugo de álabes curvados hacia adelante, que tiene como ventajas su funcionamiento con bajo nivel de ruido y su construcción liviana.

A continuación se presentan las especificaciones de los modelos más pequeños de dos marcas de ventiladores centrífugos con álabes curvados hacia adelante; de los cuales el primero (marca ILG) es distribuido por la compañía Airtec S.A, y el otro (marca LAU) por la compañía Cold Import S.A.

- Ventilador marca ILG - Modelo FCS925AC

HP	RPM VENT	V (CFM)				
		3/8" PS	1/2" PS	5/8" PS	3/4" PS	1" PS
1/6	925	880	762 836	603	528 660 750	616
	966			708		
	991			766		
	1012					
	1044					
	1145					

- Ventilador marca LAU - Modelo A9-7 ACE

$\dot{V}$ CFM	1/4" PS		1/2" PS		3/4" PS		1" PS	
	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP
400	553	0.07	807	0.09	986	0.14	1133	0.19
600	563	0.09	790	0.13	954	0.19	1118	0.22
800	599	0.11	793	0.16	946	0.22	1097	0.31
1000	644	0.14	813	0.19	954	0.26	1092	0.34

En las tablas anteriores :

$\dot{V}$  : flujo volumétrico de aire (CFM), pie<sup>3</sup>/min

P.S: presión estática, pulg de columna de agua

En las especificaciones de los ventiladores centrífugos ILG y LAU, antes anotadas, se muestran los puntos de sus curvas H-Q, correspondientes al pico de sus gráficas características.

Con ayuda de la curva de funcionamiento típico de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia adelante, fig. 5.22, podemos trazar aproximadamente las curvas H-Q de los ventiladores ILG y LAU y la curva del sistema. Ver figura 5.26.

En la figura 5.26 podemos apreciar que más próximo a la curva del sistema está el punto de funcionamiento óptimo del ventilador LAU, y aun cuando ambos ventiladores son grandes<sup>(1)</sup>, pues el punto de operación está a la izquierda del pico de máxima eficiencia; el ventilador LAU funcionará a mayor eficiencia que el ILG y es el que se selecciona para el equipo.

1) Cuando el ventilador es muy grande, se presenta inestabilidad de operación.

Ventilador seleccionado<sup>(1)</sup> marca : LAU  
modelo : A9-7 ACE

La compañía que distribuye los ventiladores LAU, los vende con el motor instalado. Las características del conjunto motor ventilador son .

Ventilador : marca : LAU  
modelo : A9-7 ACE  
fabricación : U.S.A

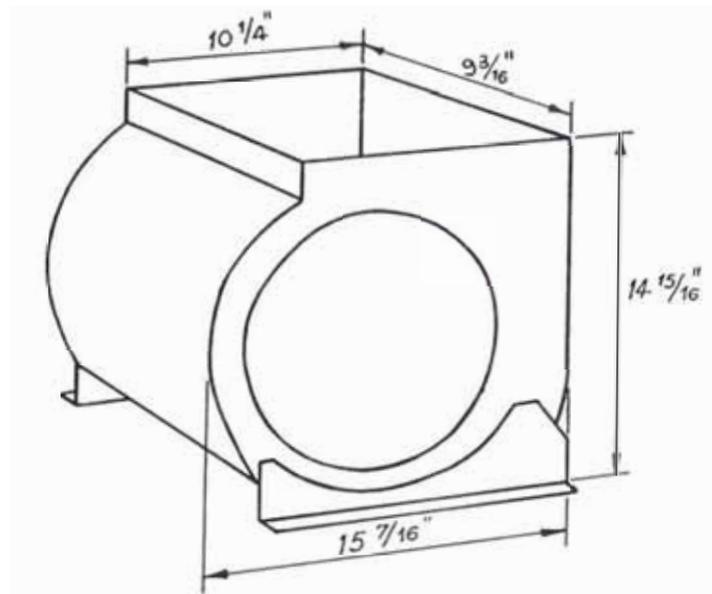
Motor : marca : General Electric  
potencia : 1/3 HP  
rpm : 1725 rpm  
115/230 V ; 60 c

Dimensionamiento definitivo de las piezas N<sup>o</sup> 1 y  
N<sup>o</sup> 7

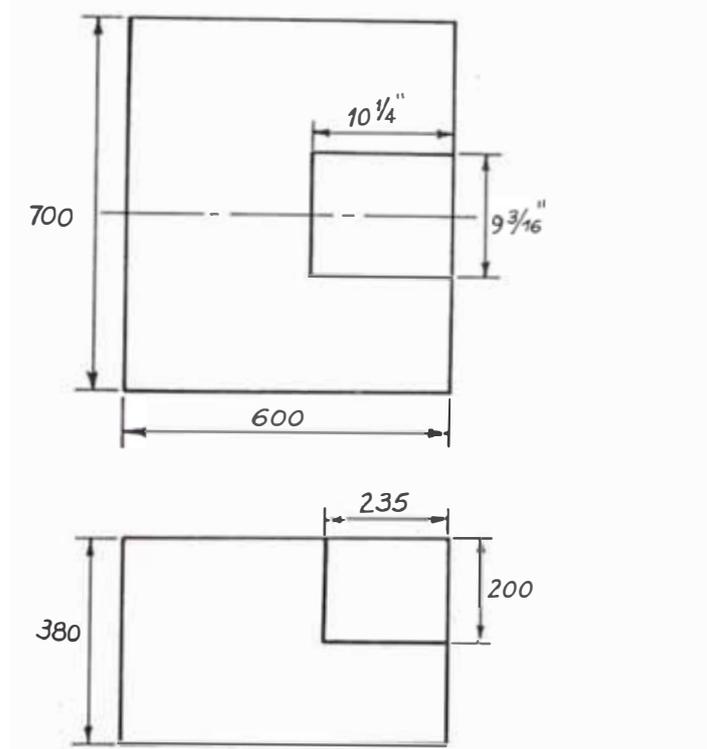
En el punto 5.3.2, se dió dimensiones aproximadas al elemento N<sup>o</sup> 1 o caja de succión y quedó pendiente el dimensionamiento del elemento N<sup>o</sup> 7. Ahora que se ha seleccionado el ventilador, podemos darle las medidas más adecuadas a estas piezas.

- 1) La selección del ventilador se hizo entre dos alternativas por la premura del trabajo; lo más conveniente hubiese sido diseñar un ventilador para los requerimientos de nuestro sistema.

Dimensiones principales del ventilador seleccionado

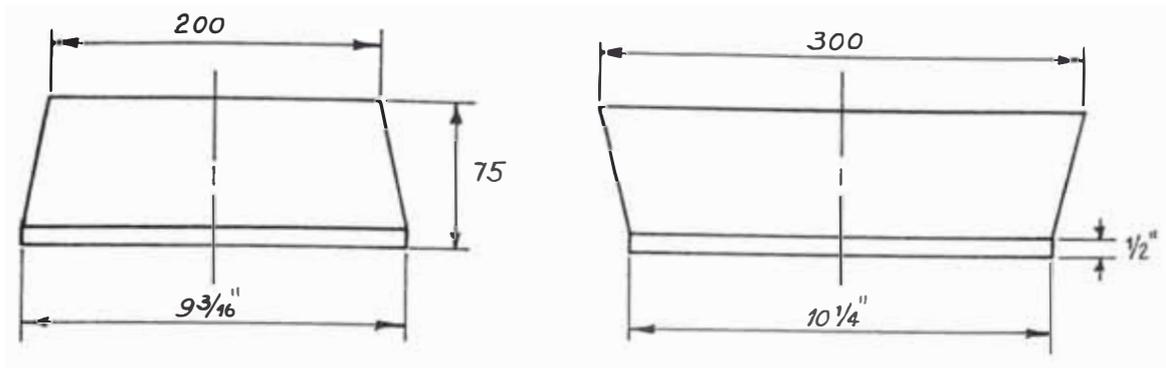


Dimensiones de la pieza N<sup>o</sup> 1



Dimensiones de la pieza N<sup>o</sup> 7

La pieza N<sup>o</sup> 7 es el elemento de transición entre la salida del ventilador (de sección comercial)  $10 \frac{1}{4}''$  x  $9 \frac{3}{16}''$  y la pieza N<sup>o</sup> 2 de sección 300 x 200 mm.



Como podemos observar, las dimensiones definitivas halladas, no varían sustancialmente con las supuestas en el párrafo 5.3.2, por tanto, no es necesario hacer correcciones en los cálculos de caída de presión en estas piezas.

## 5.5 Selección del deshumecedor

### 5.5.1 Cantidad de agua a evaporar ( $\dot{m}_w$ )

De cálculos en b.2, para secar un material ideal de  $M_i=0.85$  a  $M_f=0.05$ , en 10 horas, la cantidad de agua a evaporar <sup>(1)</sup> es  $\dot{m}_w=0.16842$  kg agua/hr.

Esta cantidad de agua va a ser captada por el aire de secado y para hacerlo recircular a través del producto debe ser extraída en el serpentín evaporador del deshumecedor.

- 1) Si el tiempo de secado es mayor,  $\dot{m}_w$  será menor, y es lo que generalmente va a ocurrir en los ensayos.

### 5.5.2 Cantidad total de energía que debe extraerse del aire ( $Q_e$ )

En el párrafo b.2, se evaluó la temperatura del aire al salir de la cámara de secado  $t_{sal}=t_3=76.5$  °C.

Los equipos de acondicionamiento de aire tienen sus evaporadores en forma de serpentín o parrilla, en los cuales el fluido refrigerante alcanza temperaturas por debajo de 0 °C.

Usar uno de estos equipos en el banco experimental para enfriar aire a 76 °C no es recomendable debido a que bajo estas condiciones su capacidad disminuye. Estos equipos operan normalmente si la temperatura del aire es alrededor de 90 °F (32 °C) y su capacidad decrece en aproximadamente 6 % por cada 10 °F de incremento de la temperatura del aire.

Por tanto, para poder usar el equipo aprovechando su funcionamiento a mayor capacidad, se debe enfriar previamente el aire desde el punto 3 hasta el punto 3' (ver figura 5.27).

Para tal fin y aprovechando la existencia en el Laboratorio de Ciencias de un intercambiador de tubos aleados tipo parrilla, se instala en el equipo de manera que el aire pase por éste, antes que lo haga por el serpentín evaporador del deshumecedor.

Observando las condiciones del aire en la carta psicrométrica, figura 5.27, el aire que sale de la cámara de secado, punto 3, debe ser enfriado hasta el punto 5 para poder conseguir las condiciones iniciales del punto 2.

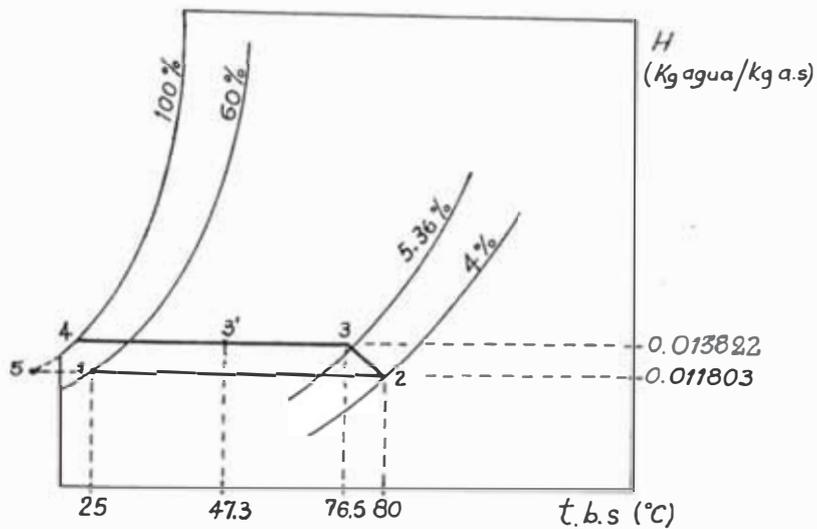


Figura 5.27 Condiciones del aire de secado ubicadas en la carta psicrométrica

5.5.2.1 Balace térmico entre el aire de secado y el agua del intercambiador tipo parrilla

La temperatura del aire que se logra al hacerlo pasar por el intercambiador se obtiene del siguiente balance térmico, suponiendo que el sistema limitado por el ducto es adiabático.

$$(\dot{m} c_p \Delta t)_{\text{agua}} = (\dot{m} c_p \Delta t)_{\text{aire}} \dots\dots\dots(5.17)$$

Despejando de la relación anterior, obtenemos :

$$t_{\text{sal.aire}} = t_{\text{i.aire}} - \left[ \frac{(\dot{m} c_p \Delta t)_{\text{agua}}}{(\dot{m} c_p)_{\text{aire}}} \right]$$

Donde  $t_{\text{sal. aire}}$ , es la temperatura del aire al salir del intercambiador y en la figura 5.27 se representa por el punto 3' y  $t_{\text{i. aire}}$ , es la temperatura del aire que sale de la cámara de secado e ingresa al intercambiador de calor, es decir,  $t_{\text{i. aire}} = t_3$ .

Según mediciones realizadas en el laboratorio, el flujo másico de agua que puede hacerse circular en el intercambiador (valor promedio), es  $\dot{m}_{\text{agua}} = 0.1 \text{ kg/s}$  el flujo másico de aire  $\dot{m}_a$ , a considerar en los cálculos, es el obtenido en b.1, es decir,  $\dot{m}_a = \dot{V} \rho$ , considerando la densidad del aire a las condiciones de salida de la cámara de secado tenemos que  $\rho = 1.0032 \text{ kg/m}^3$  por tanto,  $\dot{m}_a = 0.06 \times 1.0032 = 0.0601 \text{ kg/s}$ . Además,  $c_p$  aire a  $76.5 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $5.36 \%$  de humedad relativa es  $1.0294 \text{ kJ/kg }^\circ\text{K}$ .

$c_p$  agua a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  es  $4.181 \text{ kJ/kg }^\circ\text{K}$ .

Luego, considerando que  $\Delta t_{\text{agua}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ , tenemos :

$$t_{\text{sal, aire}} = 76.5 - \frac{0.1 \text{ kg/s} \times 4.181 \text{ kJ/kg }^\circ\text{K} \times 4 \text{ }^\circ\text{C}}{0.0601 \text{ kg/s} \times 1.0294 \text{ kJ/kg }^\circ\text{K}}$$

$$t_{\text{sal, aire}} = t_3' = 49.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

La energía total que debe extraerse del aire,  $\dot{Q}_e$ , se obtiene de la siguiente relación :

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_a (h_{3'} - h_5) \dots\dots\dots (5.18)$$

Los valores de  $h_{3'}$  y  $h_5$  se obtienen de la ecuación 2.19.a, o de la carta psicrométrica.

$$h_{3'} = 103.27 \text{ kJ/kg}$$

$h_5 = 65.83 \text{ kJ/kg}$  ; reemplazando estos valores en la ecuación anterior, tenemos :

$$Q_e = 0.0601 \text{ kg/s} (103.27 - 65.83) \text{ kJ/kg} - 2.25 \text{ Kw}$$

$$Q_e = 2.25 \text{ Kw} \quad (7677 \text{ btu/hr})$$

Por tanto, la cantidad total de energía que debe ser extraída del aire por una unidad de deshumidificación es 7677 btu/hr.

## 5.6 Partes complementarias

Se ha clasificado como partes complementarias del equipo de secado al sistema de control automático del deshumedecedor, al elemento de humidificación y a la fuente de luz artificial consistente en una lámpara incandescente que se emplea para ensayos de secado mixto o a temperatura constante.

### 5.6.1 Sistema de control automático del deshumedecedor

La temperatura, humedad relativa y velocidad del aire son parámetros que deben permanecer constantes durante un ensayo de secado.

La temperatura y velocidad se controlan con el reóstato (Variac) y la compuerta N° 1 respectivamente. La humedad relativa debe ser controlada con un control automático, que para un valor determinado de este parámetro, cierre o abra el interruptor de encendido del des-

humedecedor. El deshumedecedor debe encender cuando la humedad relativa del aire sobrepasa el valor seleccionado y apagarse cuando su humedad está por debajo de dicho valor.

La máxima diferencia entre los valores a los cuales se enciende y apaga el deshumedecedor debe ser de 5%.

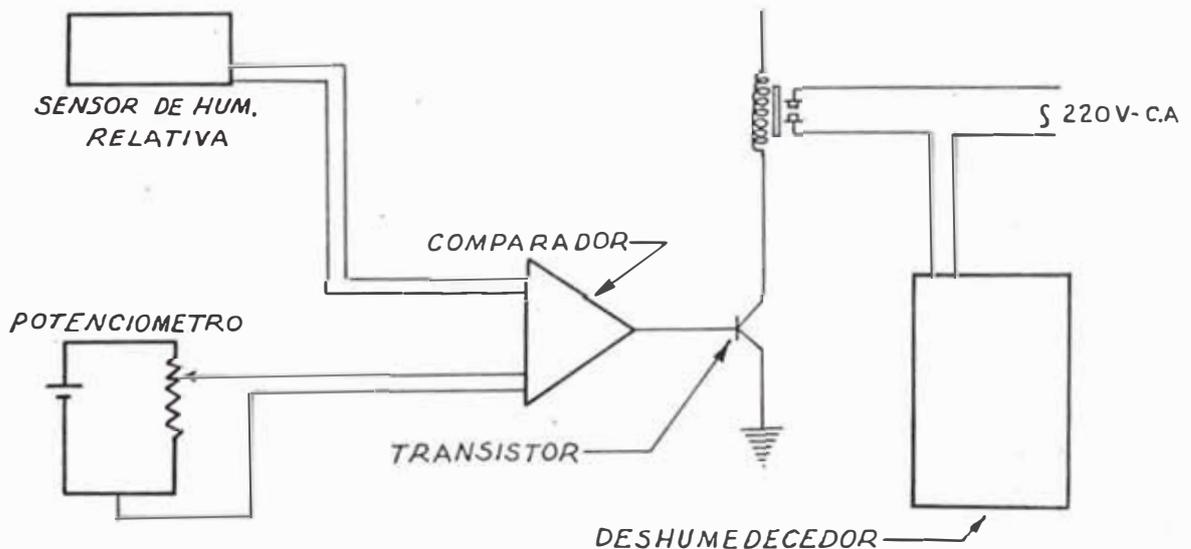
Existen controles automáticos que funcionan aprovechando la propiedad de los cabellos de cambiar de longitud con la variación de la humedad relativa del medio que los rodea; de manera que al alargarse o acortarse accionan el interruptor del deshumedecedor. Este tipo de controles no son apropiados para ser usados en el equipo experimental por su lentitud en accionar el deshumedecedor. El deshumedecedor General Electric tiene este tipo de control y al ser probado, para distintos valores de referencia, se halló en promedio, una diferencia entre el valor de humedad relativa de encendido y apagado de 15 %, valor muy alto como para poder establecer un valor constante de dicho parámetro.

El control automático a construir es electrónico y su principio de funcionamiento consiste en comparar la señal en voltios que emite el sensor de humedad relativa con un voltaje de referencia establecido. Si el voltaje que emite el sensor es mayor que el nivel de referencia, un comparador emite una señal positiva a un transistor que excita a un relay y enciende el deshumedece-

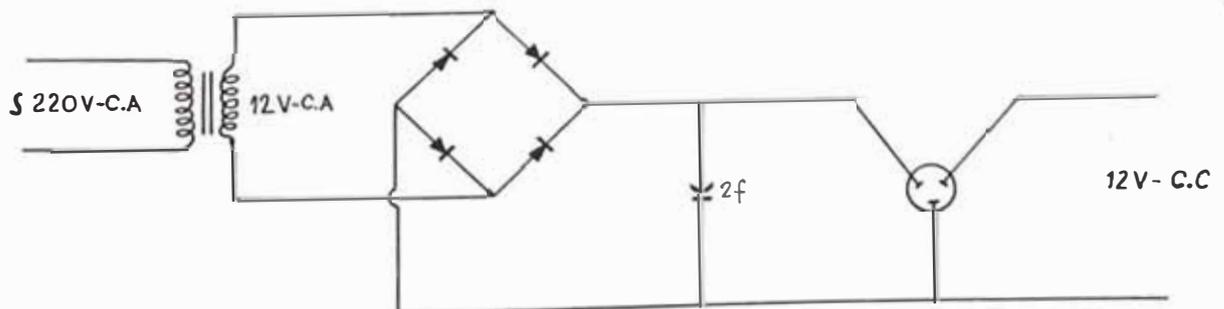
dor. Si el voltaje emitido por el sensor es menor que que el nivel de referencia, el comparador emite una se- ñal negativa al transistor y éste desconecta el circuito del relay, apagando el deshumedecedor.

La equivalencia de la señal en voltios y la hume- dad relativa es :  $0 \text{ V} = 0 \%$   
 $1 \text{ V} = 100 \%$

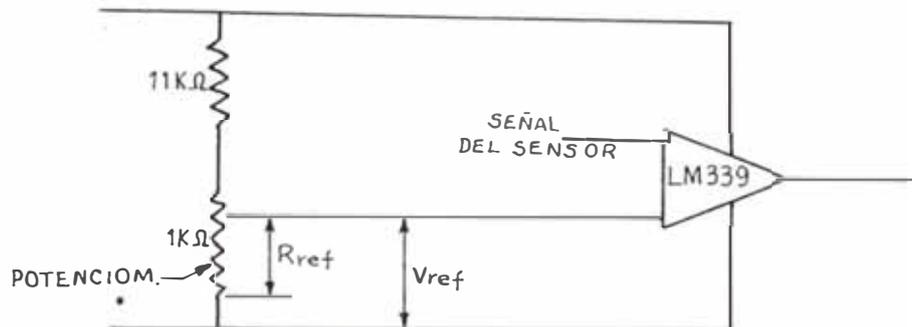
El esquema básico del control automático se mues- tra a continuación.



En el control automático se necesita una fuente es- table de corriente continua de 12V. Esta se logra median- te el circuito rectificador que se muestra :



Para comparar el voltaje de referencia y el que emite el sensor de humedad relativa se usa el circuito integrado LM339. Como la señal del sensor es de 0 a 1V, el voltaje de referencia debe variar en este rango; esto se logra con el potenciómetro de 1 k de la siguiente manera



$$I = \frac{V}{R_{\text{total}}} = \frac{12V}{12000\Omega} = 0.001 \text{ A}$$

$$V_{\text{ref,mín}} = 0.001 \text{ A} \times 0\Omega = 0 \text{ V}$$

$$V_{\text{ref,máx}} = 0.001 \text{ A} \times 1000\Omega = 1 \text{ V}$$

Completan el circuito del control automático una resistencia en la base del transistor que limita la corriente de entrada y un diodo conectado en paralelo al relay como protección de este último. Ver figura 5.28.

### 5.6.2 Elemento de humidificación

El control automático electrónico enciende el deshumecedor cuando la humedad relativa del aire es superior al valor de referencia o valor de ensayo. Cuando se alcanza dicho valor, el deshumecedor se apaga, pero la humedad relativa sigue disminuyendo, entonces, cuando

el proceso de secado está en el periodo final (periodo de velocidad de secado decreciente), la superficie del producto se encuentra seca y toma tiempo alcanzar la humedad relativa de ensayo.

En estas circunstancias, es necesario incrementar la humedad del aire por otros medios.

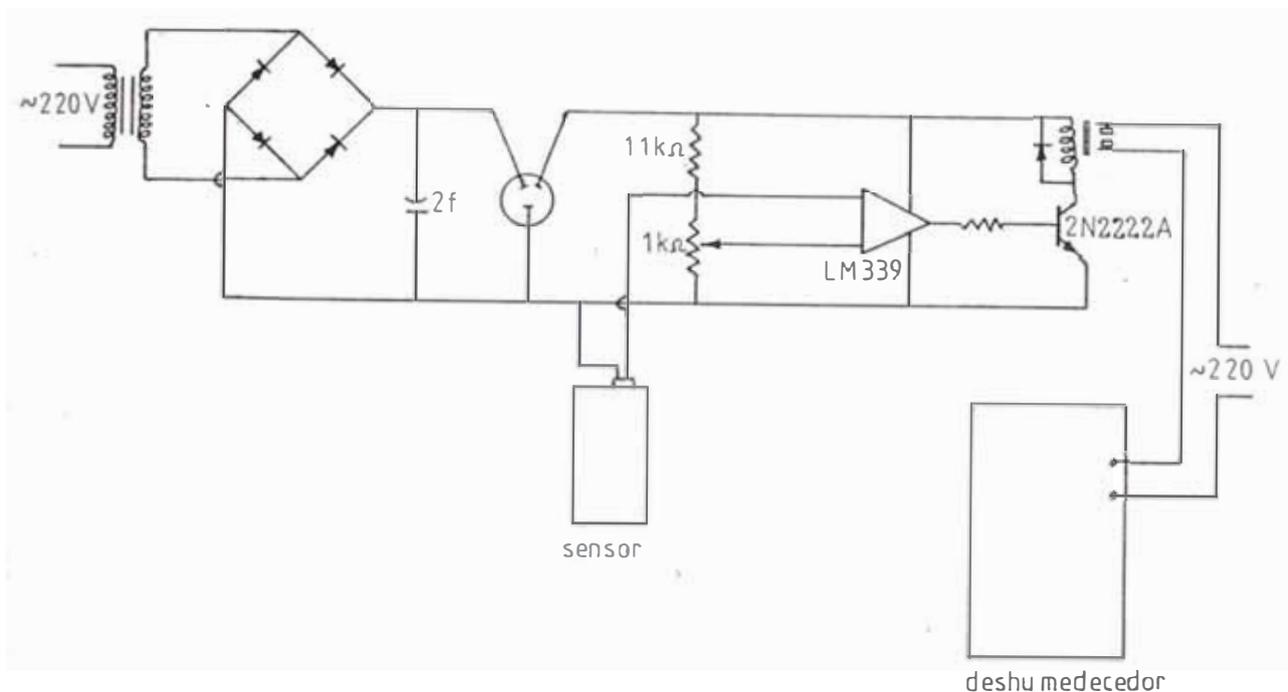


Figura 5.28 Esquema del circuito completo del control automático del deshumedecor

Puede diseñarse para tal efecto una cámara de rocío, que consiste en un rociador de agua instalado en un recinto en el cual se hace circular el aire o de una manera más simple, humidificar el aire inyectando vapor en el ducto principal, esto por recomendaciones de la referencia bibliográfica N<sup>o</sup> 18.

En el banco experimental se va a usar el último método, mencionado líneas arriba, haciendo hervir agua en un recipiente e inyectando el vapor a través de una manguera enrollada dos vueltas antes de llegar al ducto principal para evitar que pase agua líquida hacia la cámara de secado. Ver figura 5.31.

La variación de la temperatura del aire no es apreciable cuando la cantidad de vapor inyectado es pequeña. Si la variación fuese apreciable debe controlarse con el reóstato.

### 5.6.3 Fuente de luz para ensayos de secado mixto

En un secador indirecto el aire es calentado en un colector solar, (en el equipo experimental por la resistencia eléctrica) e impulsado a través del producto en la cámara de secado. El proceso de secado es adiabático o ligeramente diferente a él si los efectos de radiación y/o conducción son considerados. En la figura 5.29 se muestra esquemáticamente el proceso.

En un secador tipo mixto, el aire es primero precalentado y luego pasado a través de la cámara de secado; esta tiene una cubierta transparente de manera que el producto y el aire continúan recibiendo energía. El proceso en la cámara de secado tiende a ser a temperatura de bulbo seco constante como puede apreciarse en la figura 5.30 .

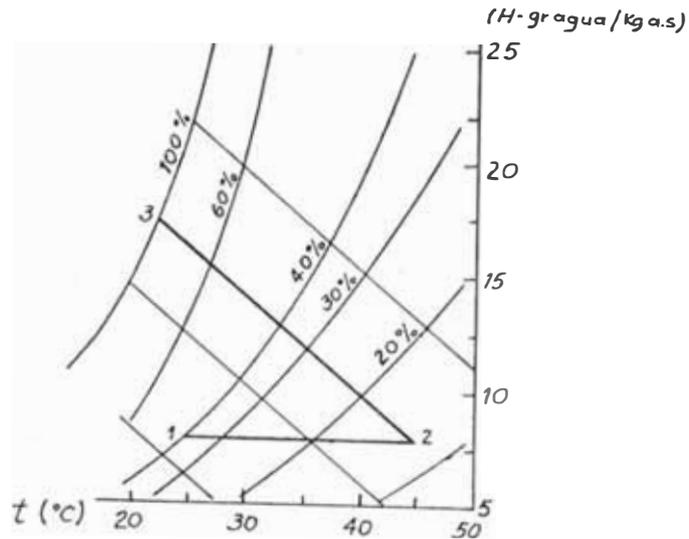


Figura 5.29 Proceso de secado en un secador indirecto

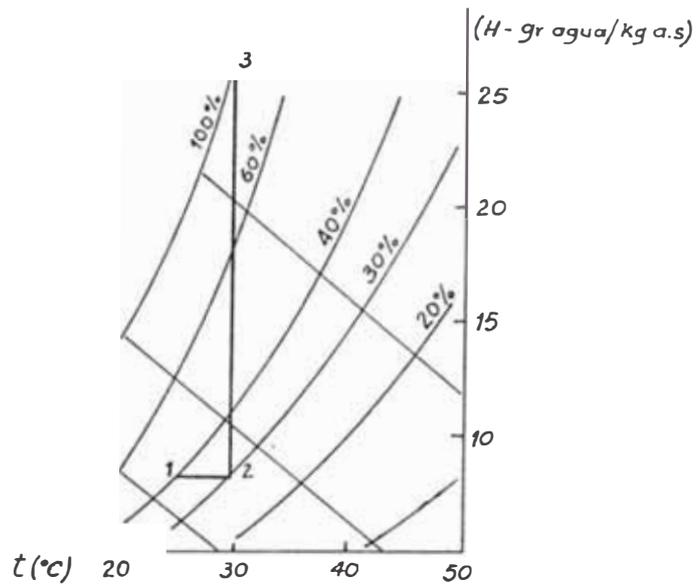


Figura 5.30 Proceso de secado en un secador tipo mixto

De la figura 5.30 se puede apreciar que con un menor precalentamiento, teóricamente se podría remover mayor cantidad de humedad que con un secador indirecto.

Para los ensayos de secado a temperatura de bulbo seco constante (secador mixto), la luz solar es reemplazada por una fuente de luz artificial consistente en una

lámpara incandescente de 250 Watts.

La radiación se mide con un radiómetro y se controla variando la distancia de la fuente de luz a la cubierta de la cámara de secado. En la figura 5.31, se muestra un esquema del equipo experimental para ensayos de secado a temperatura de bulbo seco constante.

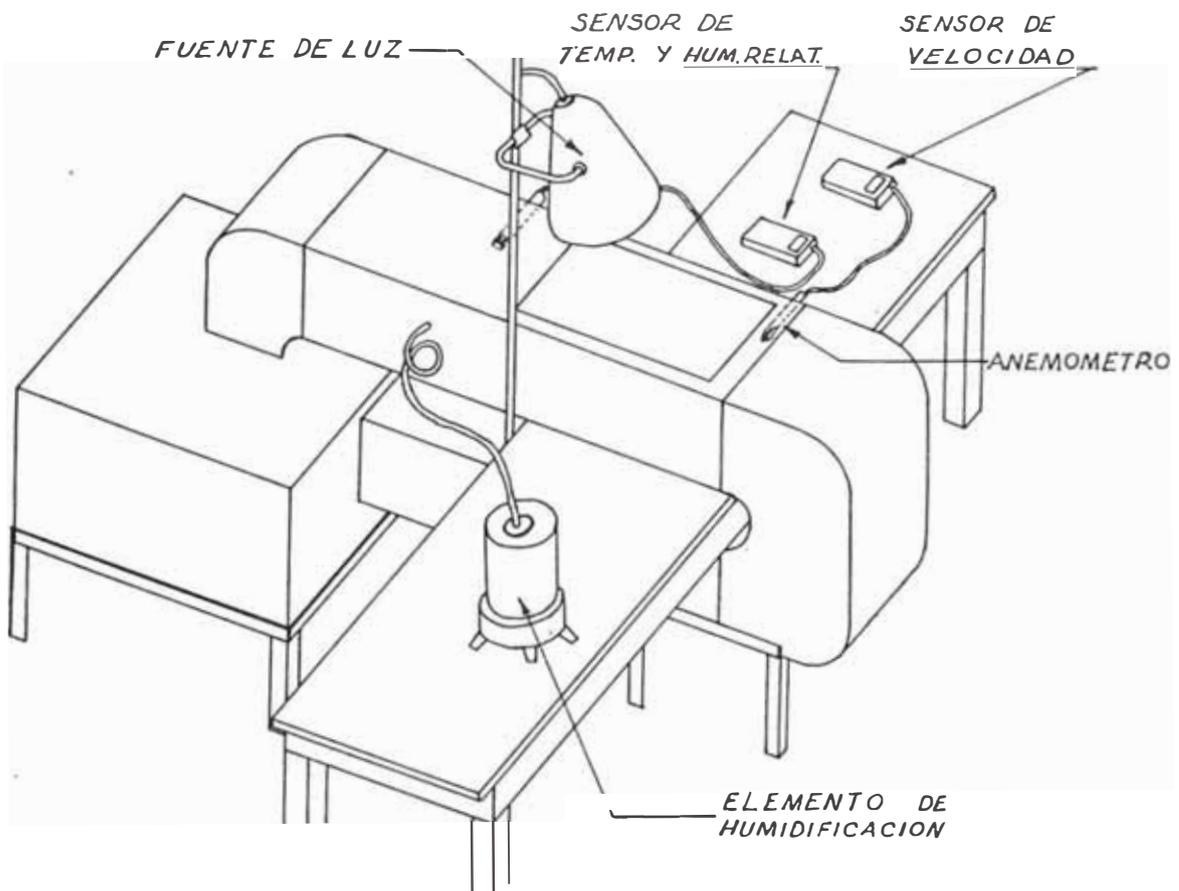


Figura 5.31 Disposición del banco experimental para ensayos de secado a temperatura de bulbo seco constante

## C A P I T U L O 6

### ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 6.1 Programa

En este capítulo vamos a realizar dos tipos de ensayos bien diferenciados entre si; el primer tipo de ensayo está encaminado a la puesta a punto del banco experimental y que denominaremos "Ensayo del banco experimental" y el segundo que será la utilización del banco experimental, puesto a punto, para realizar los "Ensayos de secado".

Los ensayos del banco experimental se realizan con la finalidad de lograr el óptimo funcionamiento del equipo y conocer los parámetros del aire de secado que se pueden obtener a distintas condiciones de funcionamiento del mismo.

Con los ensayos de secado se van a obtener curvas experimentales que serán comparadas con otras obtenidas a partir de modelos matemáticos o extraídas de obras especializadas en ensayos de secado.

### 6.1.1 Ensayo del banco experimental

En la puesta a punto del banco experimental se empezará por hacer funcionar individualmente cada componente del equipo, para posteriormente hacerlo funcionar en conjunto y poder observar de esta manera las principales características de funcionamiento, tales como ruido y vibración; se verificará al mismo tiempo si existen o no fugas en las juntas del cuerpo principal.

Después de este paso previo, se realizan los ensayos necesarios para corregir defectos en unos casos o para conocer las bondades del equipo en otros, con la finalidad de tener un conocimiento completo del funcionamiento del mismo y de saber como gobernar los parámetros del aire de secado.

Los ensayos a realizarse lo podemos resumir de la siguiente manera :

- Evaluación del perfil de velocidad, funcionando el equipo con el deshumecedor National y funcionando con el deshumecedor General Electric.
- Evaluación del equipo, sin carga y con carga, funcionando con el deshumecedor National y funcionando con deshumecedor General Electric.

### 6.1.2 Ensayos de secado

Los ensayos de secado se realizan con el conocimiento previo del funcionamiento del equipo, adquirido a través de los ensayos anteriores.

Es muy importante saber como controlar los parámetros del aire, pues los datos experimentales se deben obtener para temperaturas y humedades relativas del aire, constantes.

Los resultados experimentales que se obtengan serán comparados con valores obtenidos a partir de modelos matemáticos y/o resultados experimentales obtenidos por investigadores dedicados al estudio del secado y recopilados de bibliografía especializada.

Los datos experimentales que vamos a obtener en el banco experimental son los de variación de peso del producto con el tiempo (con estos datos obtenemos la curva de secado del material) y la caída de presión del aire al pasar a través del producto. Para realizar el secado de un producto es necesario conocer previamente su contenido de humedad de equilibrio, por tanto este ensayo también lo vamos a realizar.

### 6.2 Modelos matemáticos a usar

Con el propósito de explicar o comparar con relacio-

nes matemáticas los resultados obtenidos, se desarrollan conceptos de velocidad media para los ensayos del banco experimental , y modelos matemáticos basados en fundamentos teóricos de mecanismos de difusión térmica y de masa o desarrollados empíricamente a partir de datos experimentales para los ensayos de secado.

### 6.2.1 Velocidad media

En los cálculos de flujo másico, flujo volumétrico caída de presión y en general casi en todos los cálculos en que se involucre la velocidad del fluido, se utiliza la velocidad media normal a la sección transversal del ducto.

La velocidad media se expresa matemáticamente :

$$V_m = \frac{1}{A} \int V \cdot dA \dots\dots\dots (6.1)$$

Donde : V : velocidad del fluido

A : área de la sección transversal del ducto

Una manera de determinar la velocidad media es estableciendo una relación entre la velocidad media y la velocidad máxima en la sección del ducto a partir de la ecuación 6.1 y una distribución de velocidad asumida; otra forma es utilizando normas establecidas para obtener la velocidad media.

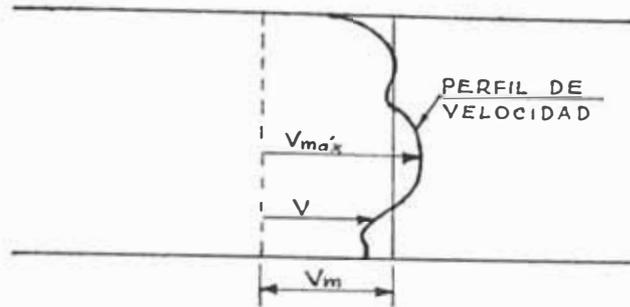


Figura 6.1 Distribución de velocidad y velocidad media

### 6.2.2 Características físicas de los granos

Las características físicas de los granos varían de un tipo a otro. Tres cantidades son usadas para describir los granos, la porosidad o fracción de vacíos, el diámetro equivalente y el factor de forma.

#### 6.2.2.1 Porosidad o fracción de vacíos (E)

Al colocar una cantidad de granos en un recipiente, el volumen total  $V_t$  está formado por el volumen de los granos  $V_g$ , más el volumen de espacios vacíos  $V_v$ .

La porosidad se define como la relación del volumen de espacios vacíos al volumen total y se determina colocando una cierta cantidad de granos en una probeta que inicialmente contiene una cantidad de agua, el volumen de agua desalojado representa el volumen de granos  $V_g$ .

$$E = \frac{V_v}{V_t} \dots\dots\dots(6.2)$$

### 6.2.2.2 Diámetro esférico equivalente ( $d_e$ )

Es el diámetro de las partículas esféricas que ocuparían el mismo volumen de los granos  $V_g$ .

$$d_e = \left( \frac{6}{\pi} \cdot \frac{V_g}{N} \right)^{1/3} \dots\dots\dots(6.3)$$

Donde : N : número de granos

### 6.2.2.3 Factor de forma ( $\alpha$ )

Es la razón del área de la superficie del grano al área de la superficie de la partícula esférica equivalente. Este factor es difícil de evaluar pero para partículas de superficie redondeada, como las piedras de río, se considera que es independiente del tamaño de partícula y aproximadamente igual a 1.5; para granos pequeños  $\alpha$  varía con el tamaño de las partículas y decrece desde 2.5 para tamaños muy pequeños hasta 1.5 para partículas de 50 mm de diámetro.

### 6.2.3 Contenido de humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ )

Según Brooker y Kososki, la utilización de ecuaciones empíricas han dado mejores resultados que las diferentes teorías existentes sobre los fenómenos de equilibrio higroscópico. Roa (1974) propuso la siguiente ecuación empírica para poder cuantificar una relación existente entre las variaciones de temperatura y humedad relativa del aire y la humedad de equilibrio del

producto.<sup>(1)</sup>

$$X_{eq} = (p_1\phi + p_2\phi^2 + p_3\phi^3) \exp\left[(q_0 + q_1\phi + q_2\phi^2 + q_3\phi^3 + q_4\phi^4)(t + q_5)\right] \dots$$

.....(6.4)

Donde :  $X_{eq}$ : contenido de humedad base seca del producto;  
decimal

$\phi$ : humedad relativa del aire; decimal

$t$  : temperatura del aire; °C

$p, q$ : parámetros que dependen del producto

#### 6.2.4 Velocidad de secado

La velocidad de secado depende de las condiciones del aire, propiedades del producto y diseño del secador.

El agua puede estar ligada al producto por fuerzas cuya intensidad varía desde las muy débiles que retienen el agua superficial, a las muy fuertes de los enlaces químicos. Como consecuencia de esto, la velocidad de secado disminuye conforme decrece el contenido de humedad del producto pues el agua que va quedando está más fuertemente unida a éste.

Durante el proceso de secado la humedad disminuye desde el valor inicial hasta un valor final que tiene como límite a la humedad de equilibrio que corresponde a las condiciones constantes del aire. El proceso de secado se puede resumir en dos periodos importantes :

1) Fuente : referencia N° 19

- a. Periodo de velocidad de secado constante o periodo antecrítico.
- b. Periodo de velocidad de secado decreciente o periodo postcrítico.

En el capítulo 3, sección 3.7, se dió la definición general de la velocidad de secado. Ahora desarrollamos este término en función de las condiciones de difusión y transmisión de calor en la capa límite del aire para el periodo antecrítico y partiendo de las ecuaciones de difusión de líquidos a través de sólidos homogéneos para el periodo postcrítico.

#### 6.2.4.1 Velocidad de secado constante ( $W_c$ )

La velocidad de secado constante se desarrolla mientras la superficie del cuerpo se encuentre  cubierta por una capa de agua líquida; lo cual ocurre durante el primer periodo del secado y puede ser evaluada en base a relaciones de transferencia de calor y de difusión de vapor. La transmisión de calor por unidad de tiempo  $q$ , será igual al producto del coeficiente global de transmisión de calor  $U$ , por el área de transferencia  $A$  y por la diferencia de temperaturas del aire de la superficie del producto ( $t_\infty - t_s$ ).

$$q = U A (t_\infty - t_s) \dots\dots\dots(6.5)$$

El coeficiente  $U$  depende del mecanismo de paso

del calor al cuerpo húmedo y en la mayoría de secados es complejo; sin embargo en muchos casos se pueden hacer simplificaciones que conducen a resultados satisfactorios. Cuando la transmisión de calor se realiza por convección desde el aire caliente a la superficie del cuerpo, el coeficiente  $U$  será igual al coeficiente de transmisión de calor por convección  $h_c$ .

El proceso de difusión de vapor tiene lugar durante el secado debido a la existencia del gradiente de presiones parciales de vapor de agua ( $p_s - p_\infty$ ), donde  $p_s$  es la presión parcial del vapor de agua en la superficie del cuerpo húmedo y  $p_\infty$  es la presión parcial del vapor de agua en el aire. La velocidad de transmisión de materia  $m$ , está dada por la siguiente ecuación :

$$m = h'_v A (p_s - p_\infty)$$

De la ecuación 2.10 tenemos que  $H=0.621 p_v$ , reemplazando esta relación en la ecuación anterior :

$$m = (0.621)^{-1} h'_v A (H_s - H_\infty)$$

Haciendo  $h' = (0.621)^{-1} h'_v$ , se tiene :

$$m = h' A (H_s - H_\infty) \quad (6.6)$$

Donde :  $m$  : rapidez de transmisión de materia; kg/hr

$h'$ : coef de transmisión de materia;  $\text{kg/hr.m}^2$

$A$ : área de transferencia;  $\text{m}^2$

$H_S$ : humedad absoluta del aire en la superficie del cuerpo;  $\text{kg vapor/kg aire seco}$

$H$ : humedad absoluta del aire de secado;  $\text{kg vapor/kg aire seco}$

Podemos relacionar la transmisión de calor por unidad de tiempo  $q$  y la rapidez de transmisión de materia  $m$ , de la siguiente manera :

$$q = m \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots(6.7)$$

En la ecuación anterior  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua. De las ecuaciones 6.5 , 6.6 y 6.7 podemos establecer la siguiente igualdad:

$$m = h' A (H_S - H_\infty) = \frac{h_c A}{\lambda} (t_\infty - t_s) \dots\dots(6.8)$$

Si la rapidez de transmisión de materia  $m$ , la referimos por unidad de superficie  $A$ , tendremos la velocidad de secado  $W_c$  .

$$W_c = h' (H_S - H_\infty) = \frac{h_c}{\lambda} (t_\infty - t_s) \dots\dots\dots(6.9)$$

En la práctica el coeficiente  $h_c$  puede conocerse con mayor exactitud y facilidad que el coeficiente  $h'$  por lo que se prefiere usar la ecuación que lo contenga. El método para hallar la temperatura  $t_s$  se desarrolló en el capítulo 5, cálculo b.2 del punto que trata de los requerimientos del sistema, 5.4.3.2. El coeficiente de transferencia de calor por convección

$h_c$ , se obtiene empleando ecuaciones obtenidas experimentalmente. (Fuente : primera ecuación referencias 7 y 12; segunda y tercera ecuación referencia 22).

- Flujo de aire a través de un lecho de granos, para  $G : 0.07$  a  $0.4 \text{ kg/s m}^2$ .

$$h_c = 650 \cdot \left[ \frac{G}{D_e} \right]^{0.7} \cdot \frac{D_e}{6 (1 - E) \alpha} \dots\dots\dots(6.10)$$

Donde :  $h_c$  : coeficiente de transferencia de calor por convección;  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$G$  : velocidad másica del aire;  $\text{kg/s m}^2$

$D_e$  : diámetro esférico equivalente; m

$E$  : porosidad o relación de vacíos; adim.

$\alpha$  : factor de forma ( $\alpha \approx 1.5$  en partículas redondeadas); adimensional

- Flujo de aire paralelo a la superficie de secado, para  $G : 2,500$  a  $30,000 \text{ kg/hr m}^2$

$$h_c = 0.02035 G^{0.8} \dots\dots\dots(6.11)$$

$h_c$  en  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  y  $G$  en  $\text{kg/hr m}^2$

- Flujo de aire perpendicular a la superficie de secado, para  $G : 4,000$  a  $20,000 \text{ kg/hr m}^2$

$$h_c = 1.163 G^{0.37} \dots\dots\dots(6.12)$$

$h_c$  en  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  y  $G$  en  $\text{kg/hr m}^2$

#### 6.2.4.2 Velocidad de secado decreciente. ( $W_d$ )

La velocidad de secado deja de ser constante y

empieza a decrecer cuando en la superficie del cuerpo que se está secando aparecen zonas secas. Estas zonas secas aparecen debido a que la difusión desde el interior del sólido no puede suministrar todo el líquido necesario para cubrir su superficie. Con el transcurso del tiempo toda la superficie del cuerpo queda libre de líquido y como consecuencia su temperatura aumenta hasta aproximarse a la temperatura de bulbo seco.

El transporte de la humedad desde el interior del cuerpo hasta su superficie puede realizarse por difusión, flujo capilar, flujo debido a contracciones, etc. La velocidad de secado puede evaluarse mediante ecuaciones del mecanismo de difusión de un líquido a través de un cuerpo sólido. Así tenemos :

- Para una partícula de diámetro  $r_o$ . (Fuente : Ref.2)

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D \cdot \pi^2 \cdot \theta}{r_o^2}\right) \dots\dots\dots(6.13)$$

La velocidad de secado de una partícula de diámetro  $r_o$  se halla derivando la ecuación 6.13 respecto al tiempo y multiplicándola por la relación del peso del sólido al área de secado  $S/A = \frac{1}{3} \rho r_o$

$$W_d = \frac{1}{3} \cdot \frac{D \pi^2}{r_o} \mathcal{J}(X - X_{eq}) \dots\dots\dots(6.14)$$

- Para una capa de producto de espesor  $z$ , relativamente pequeña en comparación a las dimensiones del área de secado. (Fuente : Referencia 22)

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \left[ \exp\left(-\frac{D \pi^2 \theta}{4 z^2}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-\frac{9 D \pi^2 \theta}{4 z^2}\right) \right] \dots(6.15)$$

Derivando la ecuación 6.15, respecto al tiempo y multiplicando por la relación  $S/A=\delta z$ , tenemos :

$$W_d = \frac{D \cdot \pi^2 \cdot \delta (X - X_{eq})}{4 z} \dots\dots\dots(6.16)$$

Una expresión aproximada de la velocidad de secado durante el periodo postcrítico se puede obtener si se supone que la variación de ésta es lineal hasta la conclusión del secado.<sup>(1)</sup> (Fuente : Ref. 22)

$$W_d = W_c \cdot \frac{(X - X_{eq})}{(X_c - X_{eq})} \dots\dots\dots(6.17)$$

Donde  $W_c$  es la velocidad de secado en el periodo antecrítico y  $X_c$  el contenido de humedad crítico.

En las ecuaciones anteriores considerar :

$X$  : contenido de humedad base seca del material; decimal; kg agua/kg materia seca

$X_{eq}$ : contenido de humedad de equilibrio; decimal

$X_o$ : contenido de humedad base seca inicial del producto; decimal

$D$  : difusividad;  $m^2/hr$

---

) Para cálculos exactos no se debe usar esta ecuación

Roa y Macedo (1976), propusieron la siguiente ecuación empírica para la curva de secado de un lecho poco profundo. (Fuente : Referencia : 19)

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} = - m q (X - X_{eq}) (p_s - p_v)^n \theta^{q-1} \dots (6.18)$$

Para condiciones constantes de temperatura y humedad relativa del aire, integrando 6.18 se obtiene

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \exp \left[ - m (p_s - p_v)^n \theta^q \right] \dots \dots (6.19)$$

Donde m, n, p, q son coeficientes adimensionales que dependen del material.

### 6.3 Resultados esperados

#### 6.3.1 Parámetros del aire de secado

De los ensayos del banco experimental, se espera obtener los parámetros del aire de secado enunciados en las consideraciones de diseño. Es decir se espera lograr aire a las siguientes condiciones :

- a. Temperatura del aire  
de 25 a 80 °C
- b. Humedad relativa del aire  
de 10 a 100 %
- c. Flujo de aire  
de 0 a 1 m/s

### 6.3.2 Ensayos de secado

Para obtener las curvas de secado, curvas de equilibrio, en el banco experimental se va a usar como materia de ensayo granos de café y cacao. Los resultados serán comparados con los presentados en la referencia N° 19 , los cuales han sido obtenidos experimentalmente y mediante modelos matemáticos.

Los resultados de la fuente bibliográfica son los que se esperan obtener y son los siguientes :

#### 6.3.2.1 Curvas de contenido de humedad de equilibrio

Las curvas de equilibrio han sido halladas experimentalmente y mediante la ecuación 6.4.

##### a. Curva de equilibrio del café

###### a.1 Muestra : Café

(Roa y Macedo; 1976)

Coefficientes de la ecuación 6.4 :

$$p_1 = 1272.0$$

$$p_2 = -32478.0$$

$$p_3 = 33341.0$$

$$q_0 = -0.0294580$$

$$q_1 = -0.0016309$$

$$q_2 = -0.0136950$$

$$q_3 = 0.0132050$$

$$q_4 = 0.0$$

$$q_5 = 273.0$$

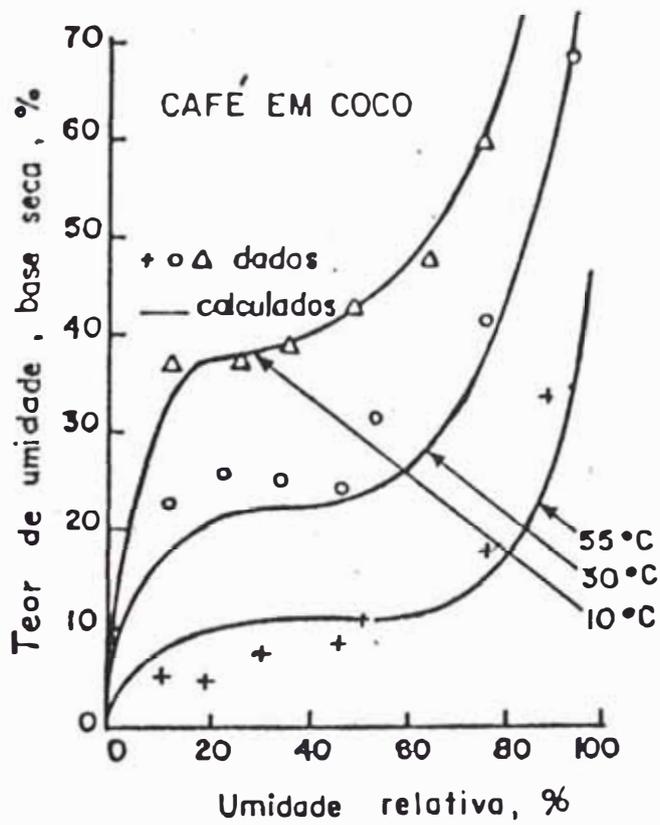
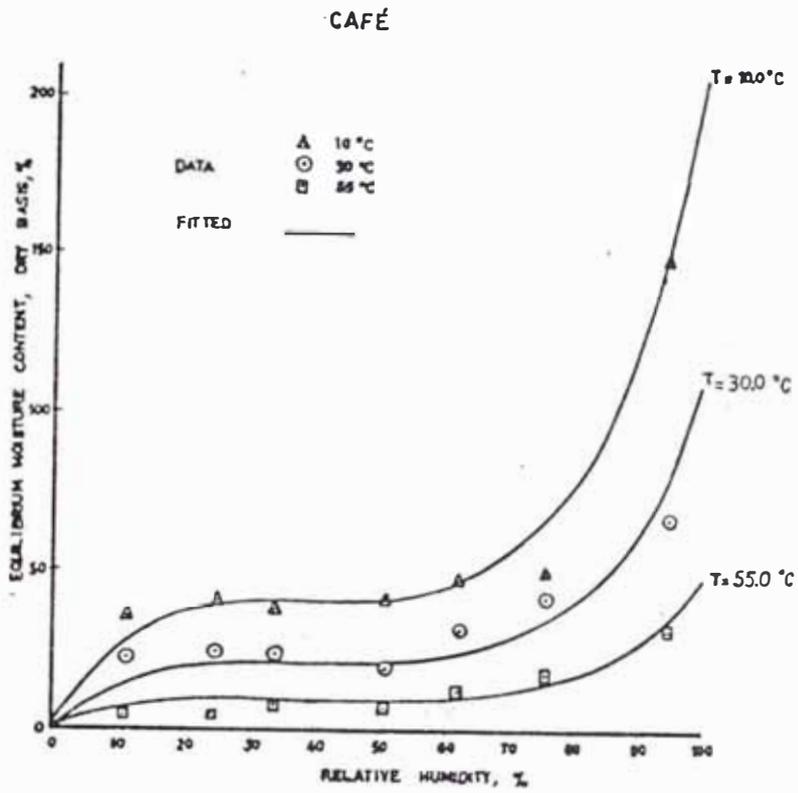


Figura 6.2 Curvas de equilibrio del café  
(Fuente : Referencia N<sup>o</sup> 19)

a.2 Muestra : Café

(Roa; 1974)

Coefficientes de la ecuación 6.4 :

$$p_0 = 4.11384 \cdot 10^3$$

$$p_1 = 6.66621 \cdot 10^3$$

$$p_2 = 5.02637 \cdot 10^4$$

$$p_3 = 0.0$$

$$q_0 = -2.6841 \cdot 10^{-2}$$

$$q_1 = 2.0752 \cdot 10^{-3}$$

$$q_2 = q_3 = q_4 = 0.0$$

$$q_5 = 273.0$$

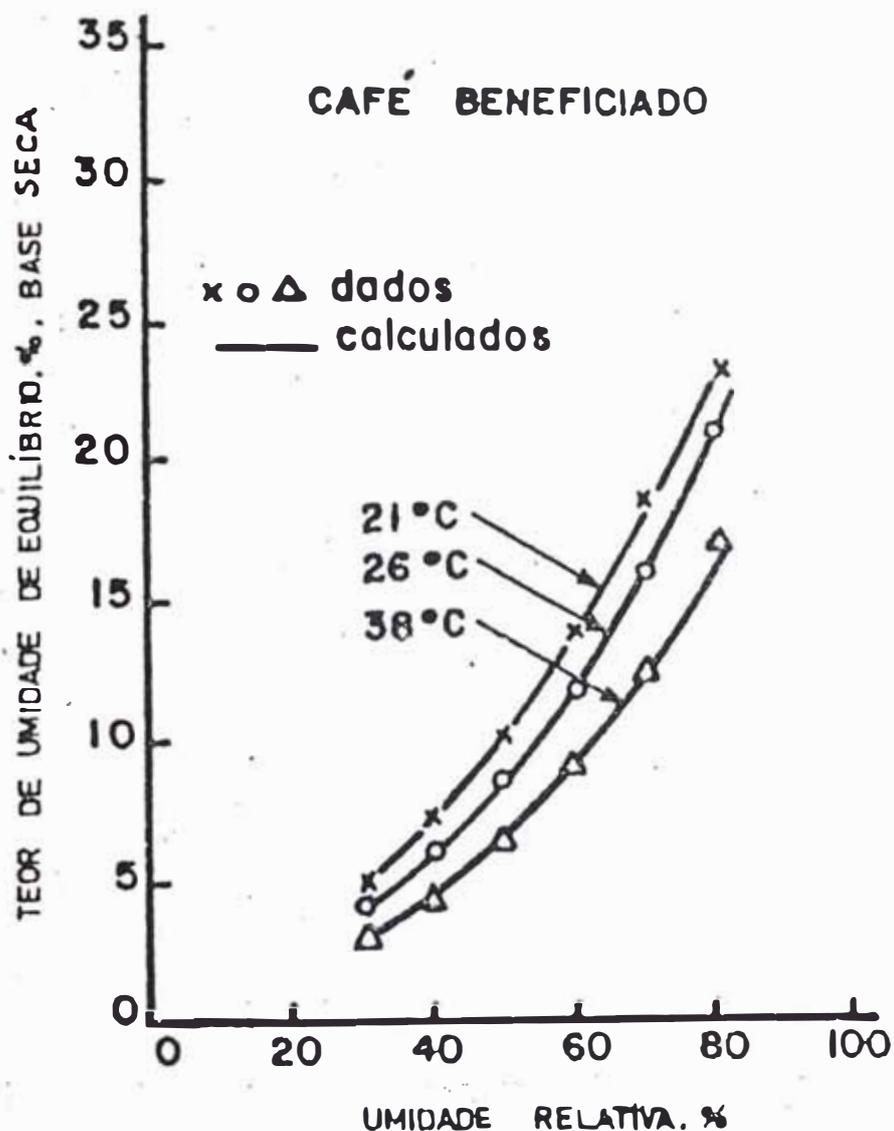


Figura 6.3 Curva de equilibrio del café  
(Fuente : Referencia N° 19)

b. Curva de equilibrio del cacao

b.1 Muestra : Cacao

(Villa e col; 1978)

Coefficientes de la ecuación 6.4 :

$$p_1 = 0.80977$$

$$p_2 = 0.95715$$

$$p_3 = -1.24230$$

$$q_0 = 0.0$$

$$q_1 = -0.03789$$

$$q_2 = 0.069851$$

$$q_3 = -0.066184$$

$$q_4 = 0.029790$$

$$q_5 = 169.44$$

CACAU

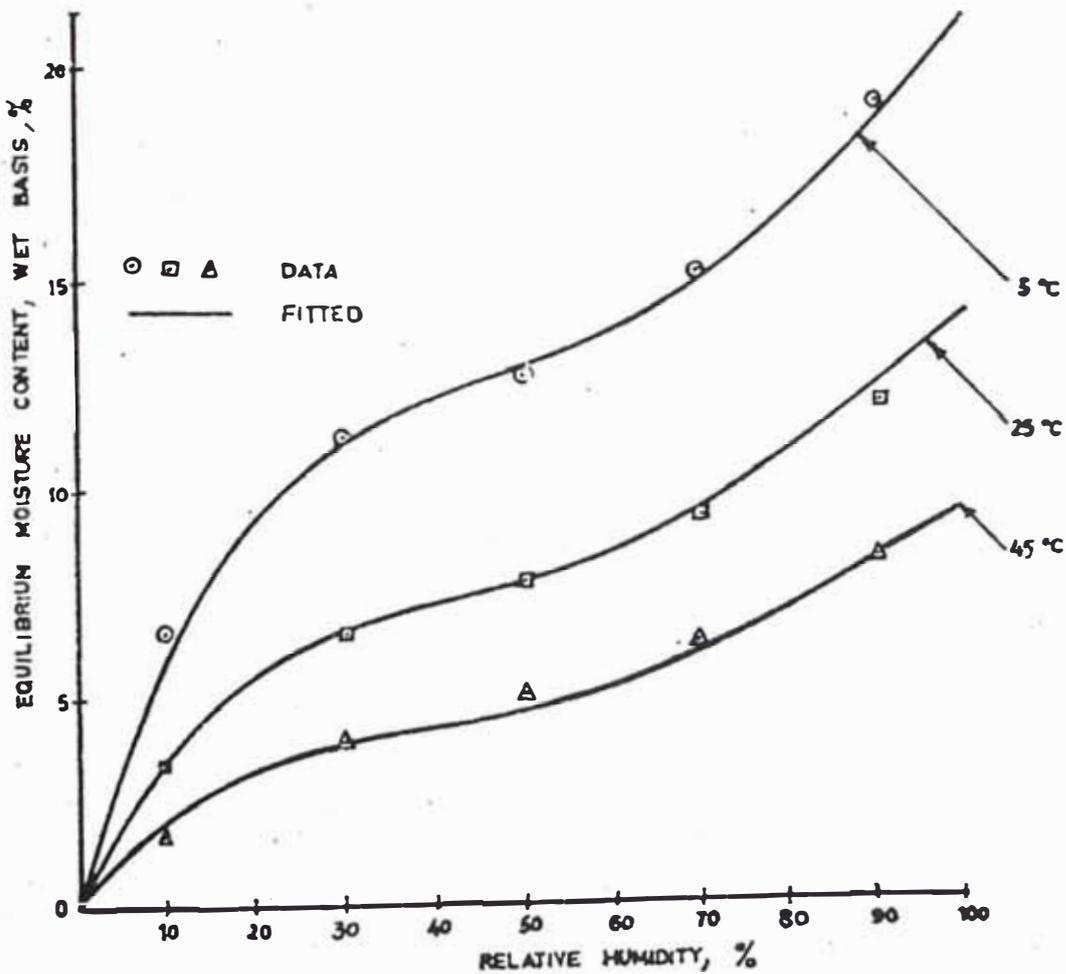


Figura 6.4 Curva de equilibrio del cacao  
(Fuente : Referencia N° 19)

b.2 Muestra : Cacao

(Roa y Rossi; 1977)

Coefficientes de la ecuación 6.4 :

$$\begin{aligned} p_1 &= 0.3330725 & q_2 &= 0.7203506 \cdot 10^{-1} \\ p_2 &= -0.6933225 & q_3 &= -0.1010270 \\ p_3 &= 0.6059627 & q_4 &= 0.4796379 \cdot 10^{-1} \\ q_0 &= 0.1158510 \cdot 10^{-2} & q_5 &= 0.3285584 \cdot 10^3 \\ q_1 &= -0.1970599 \cdot 10^{-1} \end{aligned}$$

FIGURA 6.5 Curva de Umidade de Equilibrio de Cacao Rosa

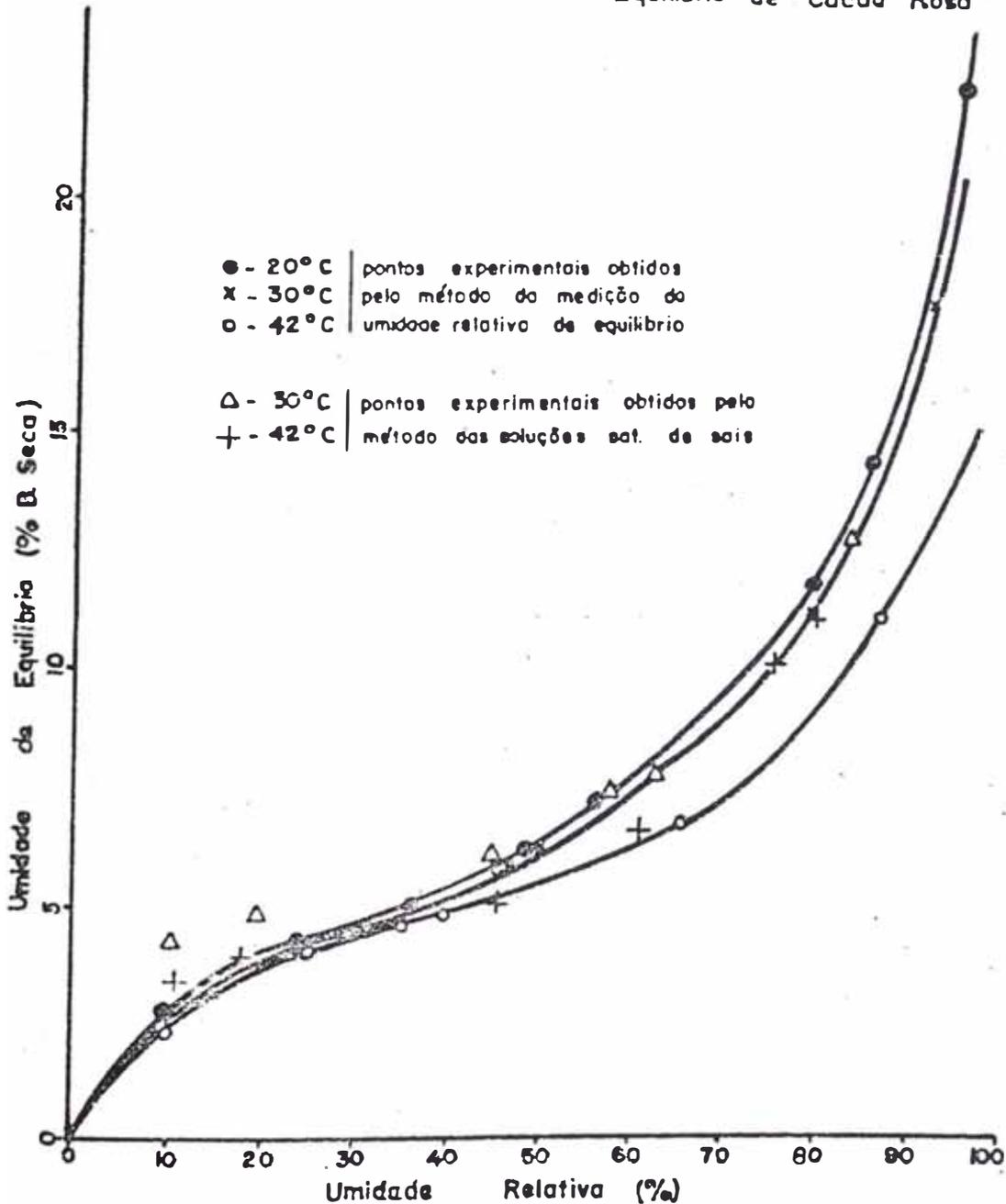


Figura 6.5 Curva de equilibrio del cacao (Fuente : Referencia Nº 19)

### 6.3.2.2 Curvas de secado

Las curvas que se presentan a continuación han sido obtenidas experimentalmente y mediante la ecuación 6.19.

#### a. Curva de secado del café

(Roa y Macedo; 1976)

Coeficientes de la ecuación 6.19 :

$m$  : 0.0009444

$n$  : 0.5233670

$q$  : 0.8008118

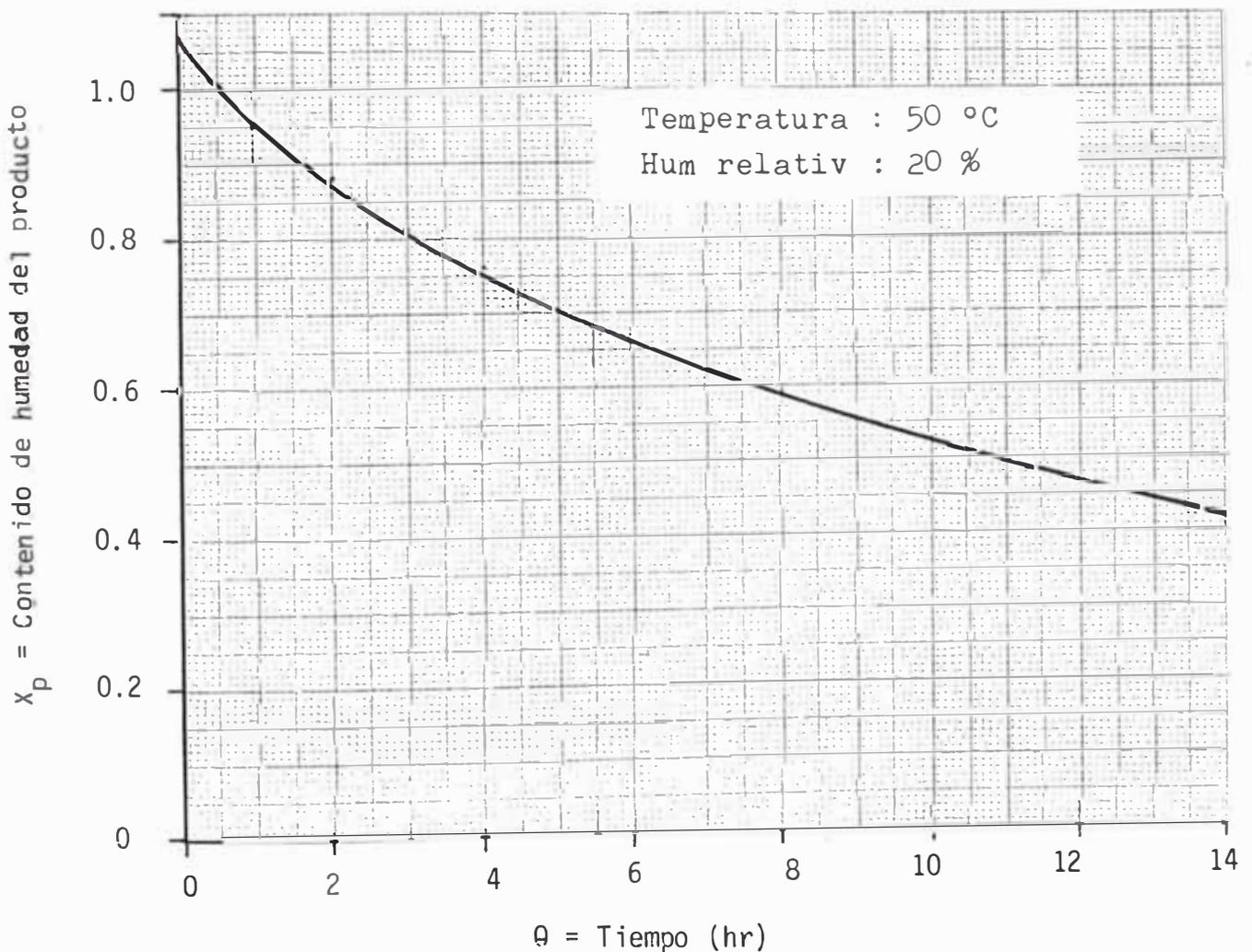


Figura 6.6 Curva de variación de humedad del producto con el tiempo de secado (Fuente : Ref. 19)

b. Curva de secado del cacao  
(Madrid; 1979)

Coefficientes de la ecuación 6.19 :

m : 0.028524

n : 0.338948

q : 0.531744

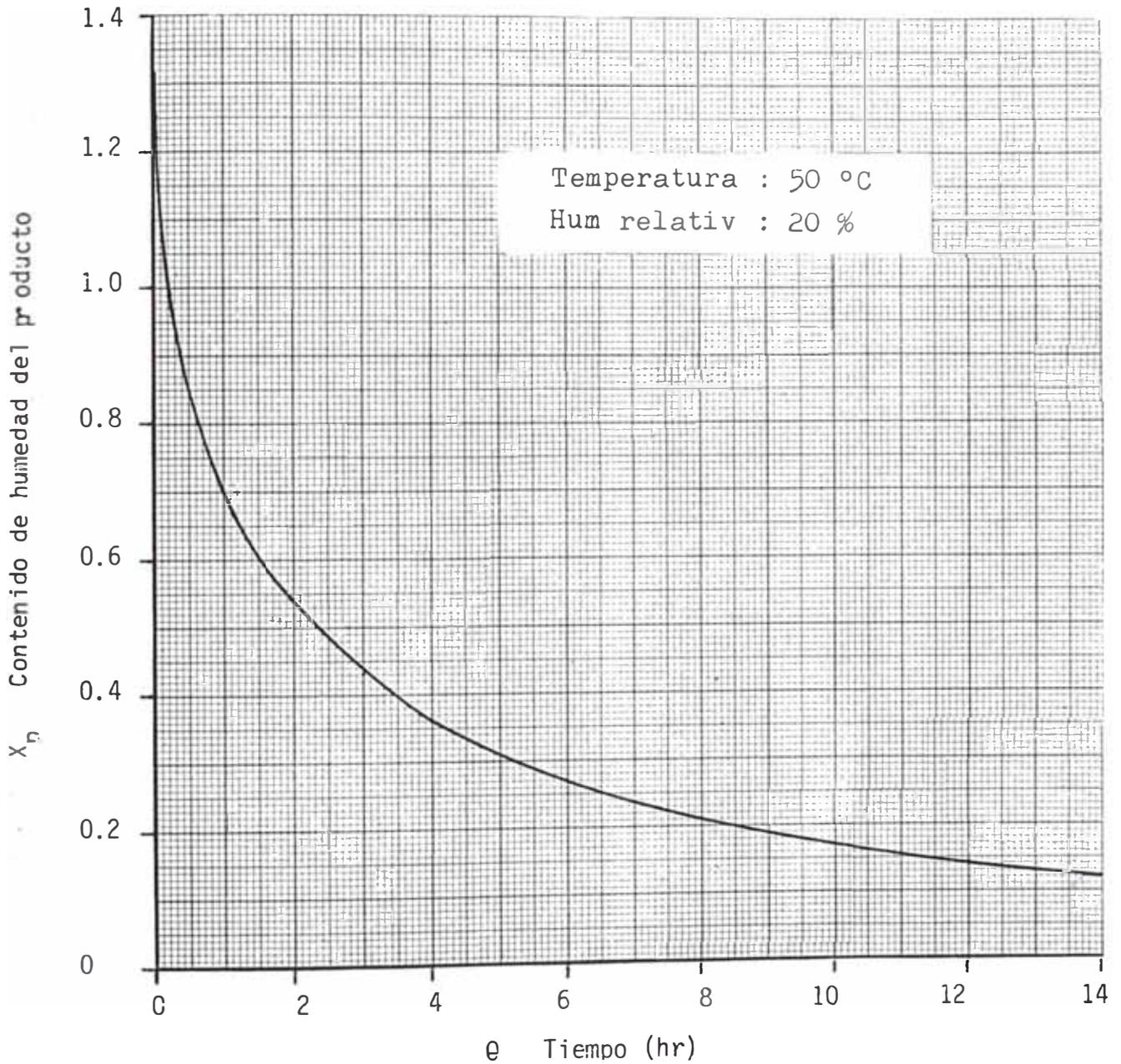


Figura 6.7 Curva de variación de la humedad del producto (cacao) con el tiempo de secado (Fuente : Referencia Nº 19)

### 6.3.3 Caída de presión en un lecho de granos

En el cálculo de la caída de presión del aire a través del sistema se usó la ecuación 5.7 para evaluar la caída de presión del aire al atravesar un lecho de granos de café. Los valores obtenidos a partir de esta ecuación son los que se esperan obtener y son los siguientes : ( $h = h_{\text{prod}}$ )

$V_o$ (m/s)	$h$ (mm.c.a)	$V_o$ (m/s)	$h$ (mm.c.a)
0.01	0.0236	0.75	11.098
0.05	0.1604	0.80	12.441
0.10	0.4170	0.85	13.886
0.15	0.7620	0.90	15.352
0.20	1.1920	0.95	16.919
0.25	1.7050	1.00	18.550
0.30	2.2990	1.05	20.247
0.35	2.9720	1.10	22.021
0.40	3.7240	1.15	23.863
0.45	4.5540	1.20	25.770
0.50	5.4570	1.25	27.757
0.55	6.4370	1.30	29.813
0.60	7.4890	1.35	31.924
0.65	8.6190	1.40	34.110
0.70	9.8190		

### 6.4 Resultados obtenidos

Evaluaremos los parámetros del aire de secado, las curvas de secado y la caída de presión en un lecho de granos. Para la obtención de los parámetros del aire se ha de probar al equipo con dos deshumecedores de diferente ca-

pacidad que se tienen en el laboratorio de la Facultad de Ciencias, uno de menor capacidad marca National y otro de mayor capacidad marca General Electric.

Los resultados obtenidos serán comparados con los resultados esperados del punto 6.3 y escogerá el que brinde mejores resultados.

Los ensayos de secado se harán con granos de café y cacao, variando las condiciones de ensayo con el propósito de ver la influencia de estos en el proceso.

El ensayo de caída de presión del aire al atravesar un lecho de granos se hace con granos de café, incluyéndose además un ensayo realizado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

#### 6.4.1 Parámetros del aire de secado

##### 6.4.1.1 Instrumentos utilizados

- Sensor digital de temperatura y humedad relativa  
marca : Higrotest  
modelo : Testo 6400  
fabricación : West Germany  
rango :  $\emptyset$  : 0 - 100 %  
          T : -199.9 - +199.9 °C  
aproximación ·  $\emptyset$  : 0.1 %  
                  T : 0.1 °C
- Sensor digital de velocidad y temperatura  
marca : Therm  
modelo : 2253 - 1

fabricación : West Germany  
rango : V : 0.3 - 20 m/s  
          T : -70 - +199.9 °C  
              +200 - +1200 °C  
aproximación : V : 0.1 m/s  
              T : 0.1 °C

#### 6.4.1.2 Procedimiento

Según la evaluación a realizar se enciende el ventilador y/o el deshumecedor. El sensor de temperatura y humedad relativa, Higratest, se ubica en el punto de medición 1; el sensor de temperatura Therm en el punto 2 y el anemómetro en el punto 4; la disposición de los puntos de medición se presenta en la figura 6.8. Con la cámara de secado libre, se regula la velocidad del aire a la cual se va a realizar el ensayo. Se anotan los datos de temperatura y humedad relativa.

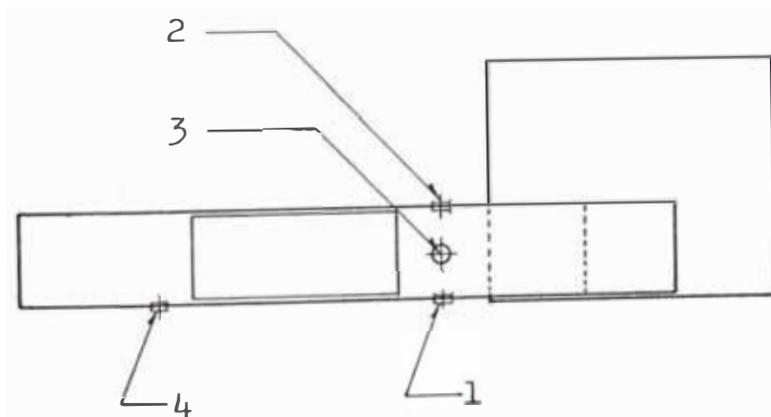


Figura 6.8 Disposición de los puntos de medición para los ensayos.

### 6.4.1.3 Datos experimentales

a. Evaluación del equipo usando el deshumecedor  
marca National

a.1 Evaluación del equipo sin carga, funcionando  
solo el ventilador

Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto

$\theta$ (min)	t (°C)	$\phi$ (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	28.1	49.5	11.8
1	28.7	47.3	11.8
2	29.0	46.9	11.8
3	29.2	46.3	11.8
4	29.7	45.7	11.9
6	30.4	44.5	12.0
8	31.2	43.3	12.2
10	31.8	42.2	12.4
12	32.4	41.3	12.5
14	33.0	40.4	12.5
16	33.6	39.7	12.8
18	34.2	38.7	13.0
20	34.6	38.1	13.1
22	35.1	37.4	13.2
24	35.6	36.6	13.3
26	36.2	35.9	13.5
28	36.3	35.7	13.5
30	36.6	35.3	13.5
35	37.2	34.3	13.7
40	37.8	33.4	13.6
45	38.5	32.6	13.8
50	38.9	31.9	13.8
55	38.9	31.4	13.7
60	39.0	31.0	13.6
70	39.3	30.3	13.6
80	39.3	29.7	13.3
120	39.3	28.1	12.5

a.2 Evaluación del equipo sin carga, funcionando solo el deshumecedor.

Vaire  $\approx$  0 m/s

$\theta$ (min)	t (°C)	$\emptyset$ (%)	H (gr agua) (kg a.s)
0	22.7	64.5	11.0
2	22.7	47.0	8.0
4	23.0	41.9	7.1
6	22.8	38.8	6.7
8	22.8	36.8	6.3
10	22.8	36.5	6.2
12	23.1	36.7	6.4
14	23.1	36.9	6.4
16	23.0	37.4	6.5
18	23.2	37.8	6.6
20	23.3	38.2	6.7
22	23.4	38.6	6.8
24	23.4	39.0	6.9
28	23.9	39.6	7.2
30	24.0	39.9	7.3

a.3 Evaluación del equipo sin carga, funcionando solo el deshumecedor y haciendo circular agua en la parrilla refrigerante

Vaire  $\approx$  0 m/s

$\theta$ (min)	t (°C)	$\emptyset$ (%)	H (gr agua) (kg a.s)
0	24.1	38.4	7.1
2	24.0	36.6	6.7
4	24.1	35.6	6.5
6	24.2	34.7	6.5
8	24.2	34.1	6.4
10	24.2	33.6	6.3
12	24.3	33.3	6.3
14	24.4	32.9	6.2
16	24.4	32.6	6.1
18	24.5	32.4	6.1
20	24.6	32.2	6.1
22	24.6	32.0	6.05
24	24.6	31.7	6.05
28	24.5	31.5	6.0
30	24.6	31.4	6.0

a.4 Evaluación del equipo sin carga, funcionando el ventilador, deshumecedor y haciendo circular agua en la parrilla refrigerante.

Vaire : 1 m/s

$\theta$ (min)	t (°C)	$\phi$ (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	25.8	29.2	6.0
2	26.9	27.9	6.0
4	27.7	26.5	6.1
6	28.5	25.4	6.1
8	29.2	24.5	6.2
10	29.9	23.9	6.2
12	30.3	23.2	6.2
14	30.8	22.7	6.2
16	31.3	22.3	6.2
18	31.7	21.9	6.2
20	32.0	21.6	6.3
22	32.4	21.3	6.4
24	32.5	21.2	6.4
26	32.9	20.8	6.5
30	33.3	20.6	6.5

a.5 Evaluación del equipo sin carga, funcionando el ventilador, deshumecedor, resistencia eléctrica (Variac:180 V) y haciendo circular agua en la parrilla refrigerante.

Vaire : 1 m/s

$\theta$ (min)	t (°C)	$\phi$ (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	37.0	16.6	6.5
2	40.0	15.0	7.0
4	41.3	14.6	7.2
6	42.3	14.5	7.6
8	42.6	14.4	7.6
10	43.3	14.3	8.0
12	43.9	14.1	8.05
14	44.1	14.1	8.1
16	44.7	13.9	8.2
18	44.6	14.2	8.4
20	45.2	13.8	8.4
22	45.3	13.7	8.4
26	45.8	13.7	8.6
30	46.4	13.4	8.7

a.6 Evaluación del equipo con carga (recipiente con agua hirviendo), funcionando solo el ventilador.

Vaire : 1 m/s

$\theta$ (min)	t (°C)	$\phi$ (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s.}}$ )
0	26.0	59.4	12.2
1	27.8	100.0	23.5
2	29.4	100.0	26.0
3	31.1	100.0	28.8
4	31.9	100.0	29.8
5	32.9	100.0	32.0
6	33.5	100.0	33.2
8	34.5	100.0	35.0
10	35.1	100.0	36.0
12	35.5	100.0	37.0
14	36.0	100.0	38.0
16	36.3	100.0	39.0
18	36.4	100.0	39.2
20	36.7	100.0	39.8
22	36.8	100.0	40.0
24	37.1	100.0	40.8
26	37.3	100.0	41.0
28	37.4	100.0	41.2
30	37.6	100.0	41.8
40	38.1	98.9	43.0
45	38.4	97.2	43.5

Nota : Se alcanzó el 100 % de humedad relativa a los 20 segundos de iniciarse el ensayo.

- a.7 Evaluación del equipo con carga (recipiente con agua caliente), funcionando el ventilador y el deshumecedor, sin hacer circular agua en la parrilla refrigerante

Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto

$\theta$ (min)	t (°C)	$\phi$ (%)	H ( $\frac{\text{gr}}{\text{kg}}$ agua a.s.)	Vol (ml)
0	37.5	90.4	39.0	
1	37.6	88.5	36.8	
2	37.8	83.5	35.0	
3	38.0	80.7	34.5	
4	38.1	78.2	34.0	
6	38.3	74.7	32.0	
8	38.4	71.1	30.9	13.0
10	38.7	67.3	29.0	20.5
12	38.9	63.7	27.5	30.5
14	39.1	60.6	27.2	39.0
16	39.3	57.8	26.2	45.0
18	39.7	55.0	25.2	53.5
20	40.3	53.0	25.0	60.0

Nota : Este ensayo se realizó inmediatamente después del anterior, manteniendo el mismo recipiente de agua caliente en la cámara de secado.

Vol : Volumen condensado en el deshumecedor.

a.8 Evaluación del equipo con carga (recipiente con agua hirviendo), funcionando el ventilador y el deshumecedor, sin hacer circular agua en la parrilla refrigerante.

Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto

$\theta$ (min)	t (°C)	$\emptyset$ (%)	H (gr agua) (kg a.s)	Vol (ml)
0	35.0	74.0	26.8	
1	37.6	100	42.0	
2	38.7	100	44.5	2.0
4	40.5	100	50.0	9.5
6	41.6	96.7	52.0	20.0
8	42.3	92.3	49.5	30.0
10	42.8	86.9	47.8	40.0
12	43.3	81.6	46.8	50.0
14	43.5	76.3	44.0	59.0
16	43.9	71.0	41.8	69.0
18	44.3	67.0	40.8	79.0
20	44.5	63.6	38.2	86.0
22	44.7	60.5	37.0	98.5
24	44.8	58.2	36.0	107.5
26	44.8	56.3	34.8	115.5
28	44.9	54.2	33.5	122.5
30	44.9	52.4	32.0	131.5
32	45.0	50.6	31.0	139.5
34	44.9	49.1	30.2	146.5
40	44.8	45.2	27.8	166.5
45	44.9	42.1	25.5	181.5
50	44.8	39.3	23.5	193.5
60	44.7	33.7	20.0	215.5

Nota : El deshumecedor se hizo funcionar al minuto de haber iniciado el ensayo es decir, cuando la humedad relativa era de 100 %.

Al apagar el equipo y abrir la puerta de la cámara de secado se obtuvo 1lml más de condensado.

Vol, es la cantidad de agua líquida que se se capta con el deshumecedor

a.9 Evaluación de la distribución de velocidad en el ducto

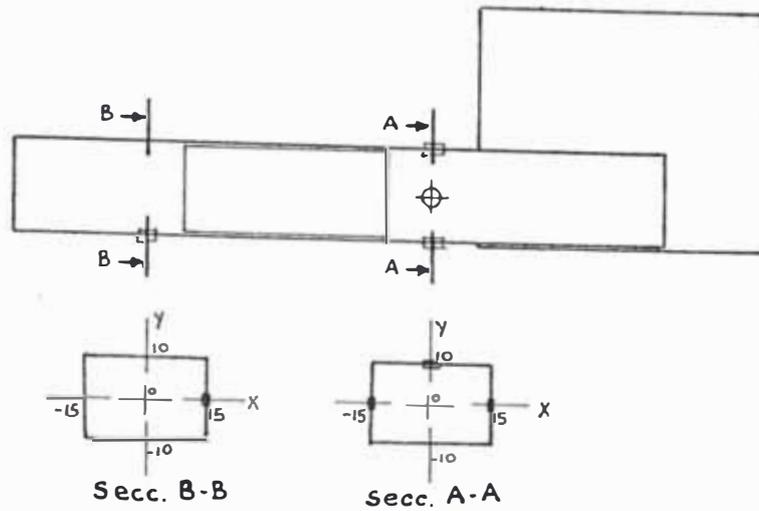


Figura 6.17 Secciones de medición

- Velocidad mínima y máxima en el ducto

Para posiciones cerrada y completamente abierta de la compuerta de regulación de flujo, se obtienen la velocidad mínima y máxima respectivamente, siendo el rango de variación de :0 a 7 m/s

- Distribución de velocidad en el eje X, sección B-B (Figura 6.18)

X (cm)	-14	-11	-9	-7	-5	-3	-1	0
V (m/s)	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
X (cm)	+1	+3	+5	+7	+9	+11	+13.5	
V (m/s)	3.0	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1	3.0	

X (cm)	-14	-11	-9	-7	-5	-3	-1	0
V (m/s)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0

X (cm)	+1	+3	+5	+7	+9	+11	+13.5
(m/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9

(Figura 6.19)

- Distribución de velocidad en el eje X,  
sección A-A (Figura 6.20)

X (cm)	-14	-11	-9	-7	-5	-3	-1	0
V (m/s)	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8

X (cm)	+1	+3	+5	+7	+9	+11	+13.5
V (m/s)	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0

- Distribución de velocidad en el eje Y,  
sección A-A (Figura 6.21)

Y (cm)	-9	-8	-6	-4	-2	0
V (m/s)	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.8

Y (cm)	+2	+4	+6	+8.5
V (m/s)	1.0	1.3	1.5	1.7

- Primera evaluación de resultados

Temperatura del aire de secado

Temp mín. y  
máx. alcanz.

24 °C

Condiciones de funcionamiento  
del equipo

Funcionando 30 minutos solo el deshu  
medecedor. Velocidad del aire  $\approx$  0 m/s  
Ver ensayo a.2.

Continúa.....

33.3 °C      Funcionando 30 minutos el ventilador, deshumedecedor y haciendo circular a agua en la parrilla refrigerante. Velocidad del aire : 1 m/s. Ver ensayo a.4.

46.4 °C      Funcionando 30 minutos el ventilador, deshumedecedor, resistencia eléctrica (Variac 180 V) y haciendo circular agua en la parrilla refrigerante Vaire : 1m/s . Ver ensayo a.5.

Humedad relativa del aire de secado

Ømín y Ømáx alcanzadas	Condiciones de funcionamiento del equipo
13.4 %	Funcionando 30 minutos el ventilador, deshumedecedor, resistencia eléctrica (Variac 180 V) y haciendo circular agua en la parrilla refrigerante Vaire : 1 m/s. Ver ensayo a.5.
100 %	Funcionando el ventilador; colocando en la cámara de secado un recipiente con agua hirviendo. Vaire : 1 m/s. Ver ensayos a.6 y a.8.

Velocidad del aire de secado

Rango de variación : 0 a 7 m/s

Distribución de velocidad : Perfil asimétrico e irregular.

- Observaciones :

- . No se satisface el requerimiento de temperatura mínima, pues se logra aire a 24 °C pero a 0 m/s.
- . El valor mínimo de humedad relativa obtenido en la cámara de secado es 13.4 % con aire a 46.4°C y funcionando el equipo sin carga. Funcionando a condiciones más críticas, como se

ha querido simular en el ensayo a.7, el mínimo valor de  $\emptyset$  fué 33.7 %; valor muy alto en comparación con el esperado.

- . El valor promedio máximo de la velocidad del aire en el equipo es de 7 m/s; valor muy elevado que debe tratar de reducirse.

- Modificaciones a realizar en el equipo

Funcionando el equipo sin carga y solo con el ventilador, la temperatura del aire se incrementa hasta 39.3 °C (ver ensayo a.1); con la finalidad de lograr que ésta disminuya y se acerque al valor requerido se instala en el equipo un radiador. El radiador adquirido ha sido usado anteriormente en el sistema de calefacción de un automóvil Fiat y se encuentra en buen estado.

Para conseguir aire con menor humedad relativa se instala el deshumecedor General Electric y con el objeto de reducir la velocidad del aire y tratar de uniformizar el flujo se coloca en la pieza N° 2 unas capas de material sintético de apariencia de esponja. Estas capas ofrecen una resistencia tal que haciendo mediciones se ha podido observar que la velocidad del aire se reduce en 0.8 m/s por cada capa colocada. Colocando 6 de éstos elementos se ha logrado reducir la velocidad

hasta 2.2 m/s. Las modificaciones realizadas se pueden apreciar en la siguiente figura.

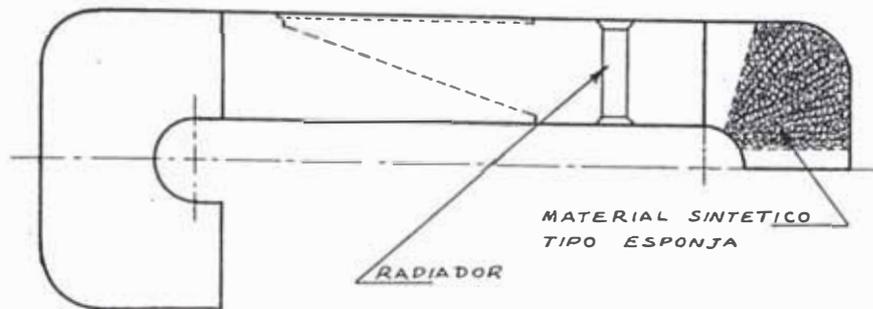


Figura 6.22 Modificaciones realizadas en el equipo

b. Evaluación del equipo usando el deshumecedor marca General Electric y los elementos agregados

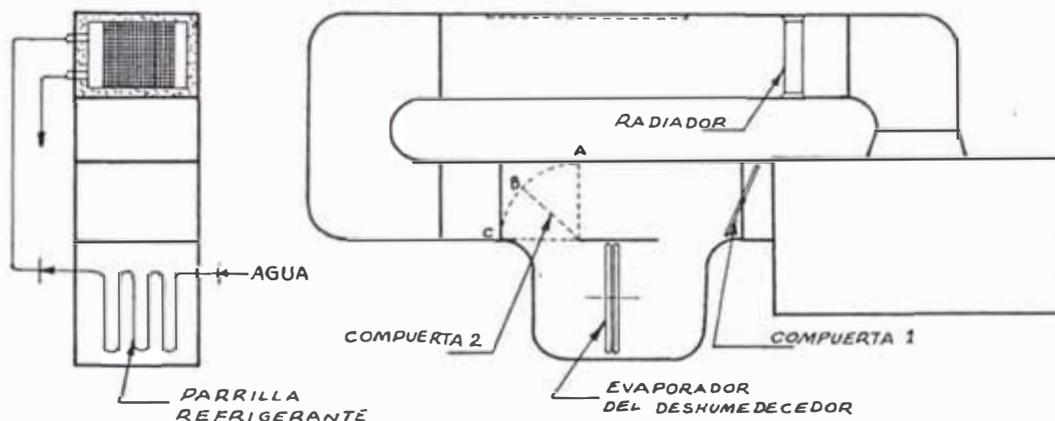


Figura 6.23 Disposición de componentes

b.1 Evaluación de la distribución de velocidad

- Velocidad mínima y máxima en el ducto

Para las posiciones cerrada o abierta de la compuerta 1, se obtiene el rango de variación de la velocidad del aire de : 0 a 2.2 m/s.

- Distribución de velocidad en el eje X,  
sección A-A (Figura 6.24)

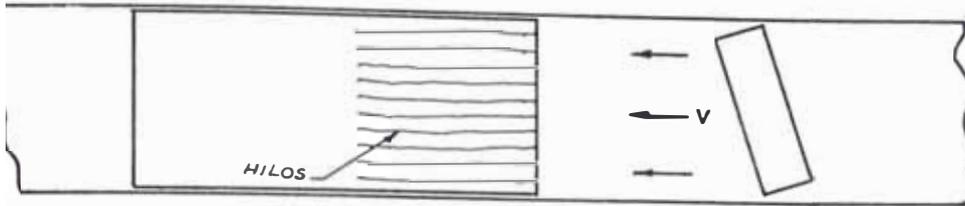
X (cm)	-14	-13	-11	-9	-7	-5	-3	-1	0
V (m/s)	0.1	0.1	0.9	1.9	1.9	1.7	1.9	1.8	1.9
X (cm)	+1	+3	+5	+7	+9	+11	+12.5	+13.5	
V (m/s)	1.9	2.0	1.8	1.6	1.3	0	0	0	

- Distribución de velocidad en el eje Y,  
sección A-A (Figura 6.25)

Y (cm)	-9	-8	-6	-4	-2	0
V (m/s)	0	0.1	2.0	2.1	1.9	1.9
Y (cm)	+2	+4	+6	+8.5		
V (m/s)	1.8	1.8	2.0	0.1		

En vista que los resultados arriba tabulados no son satisfactorios, se realiza una segunda prueba colocando para esto unos hilos en la sección B-B del ducto con la finalidad de visualizar la dirección que tienen las líneas de corriente, se vió así que los hilos se orientaban hacia las coordenadas Xnegativas y que al girar convenientemente el radiador los hilos se alineaban paralelamente a la línea de centros del ducto.

Los resultados experimentales obtenidos bajo estas condiciones son los siguientes :



Orientación de los hilos al girar el radiador

- Distribución de velocidad en el eje X, sección B-B (Figura 6.26)

X (cm)	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0
V (m/s)	0.7	0.75	0.8	1.0	1.2	1.3	1.3	1.3
X (cm)	+2	+4	+6	+8	+10	+12	+13.5	
V (m/s)	1.3	1.2	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	

- Distribución de velocidad en el eje X, sección A-A (Figura 6.27)

X (cm)	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7
V (m/s)	0	0	0.1	0.3	0.8	1.0	1.0	1.0
X (cm)	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	
V (m/s)	1.1	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
X (cm)	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8
V (m/s)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.1	1.0	1.0
X (cm)	+9	+10	+11	+12	+13.5			
V (m/s)	0.9	1.0	0.8	0	0			

Distribución de velocidad en el eje Y,  
sección A-A (Figura 6.28)

Y (cm)	-9	-8	-6	-4	-2	0
V (m/s)	0.1	1.3	2.4	2.0	1.9	1.9
Y (cm)	+2	+4	+6	+8.5		
V (m/s)	2.1	2.4	1.5	0.1		

- Velocidad media en la sección transversal  
del ducto

Con la intención de obtener un valor confiable de la velocidad media, dividimos la sección transversal del ducto en pequeños cuadrados de 1 cm de lado y se mide la velocidad del aire en cada uno de ellos. En este caso, como las pequeñas áreas de medición son iguales; la velocidad media es igual a la suma de todas las velocidades divididas entre el número de áreas de medición.

En la siguiente página se muestra la sección transversal del ducto dividida en 600 elementos y la velocidad en m/s medida en cada uno de ellos.

La velocidad media es :

$$V_m = \frac{V_1 A + V_2 A + \dots + V_{600} A}{600 A}$$

$$V_m = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_{600}}{600} = \frac{337.22}{600}$$

$$V_m = 0.56 \text{ m/s}$$

b.2 Evaluación del equipo sin carga, funcionando solo el ventilador

Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto

Compuerta 2 : Posición A (abierta)

$\theta$ (min)	t (°C)	$\emptyset$ (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	29.3	49.7	12.4
1	30.7	45.5	12.4
2	30.9	44.0	12.5
4	31.4	43.2	12.2
6	31.8	42.6	12.3
8	32.2	42.0	12.6
10	32.5	41.6	12.6
12	32.8	41.1	12.6
14	33.1	40.7	12.8
16	33.3	40.5	12.9
18	33.5	40.2	12.9
20	33.7	39.9	12.9
22	33.9	39.6	12.9
24	34.1	39.2	12.9
26	34.2	39.1	13.2
28	34.3	39.0	13.1
30	34.5	38.7	13.1
35	34.8	38.0	13.1
40	34.7	38.0	13.0
45	34.9	37.5	13.0
50	34.9	37.3	13.0
55	35.0	37.0	13.0
58	35.2	36.5	12.9
59	35.2	36.5	12.9
60	35.2	36.5	12.9

**b.3** Evaluación del equipo sin carga, funcionando solo el deshumedecedor

Vaire  $\approx$  0 m/s

Compuerta 2 : Posición A (abierta)

Sin flujo de agua en la parrilla refrigerante

$\theta$ (min)	t (°C)	$\emptyset$ (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	27.5	44.1	10.0
1	27.4	44.3	9.9
2	27.5	44.5	10.0
4	27.5	44.8	10.0
6	27.3	44.9	9.9
8	27.3	45.1	10.0
10	27.3	45.3	10.05
12	27.2	45.3	10.0
14	27.3	45.3	10.0
15	27.1	45.4	10.0
20	27.2	45.4	10.0
25	27.1	45.4	10.0
30	27.0	45.2	9.9
35	27.0	45.4	9.95
40	26.9	45.5	9.9
45	26.8	45.3	9.8
50	26.7	45.3	9.75
55	26.8	45.0	9.7
60	26.8	45.0	9.7

**b.4** Evaluación del equipo sin carga, funcionando el ventilador y deshumedecedor; haciendo circular agua en el radiador y en la parrilla refrigerante

Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto

Compuerta 2 : Posición A (abierta)

$\theta$ (min)	t (°C)	$\emptyset$ (%)	H gr agua/kg a.s
0	27.0	51.4	11.5
5	25.3	24.3	4.8
10	24.6	22.2	4.2
60	24.5	21.7	4.0

b.5 Evaluación del equipo sin carga, funcionando el ventilador y deshumecedor; haciendo circular agua en la parrilla refrigerante

Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto

$\theta$ (min)	t (°C)	$\phi$ (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
-------------------	-----------	---------------	---

Flujo agua parrilla refrigerante : 76.6 ml/s

Compuerta 2 : Posición A (abierta)

0	25.1	51.2	10.0
1	25.1	44.9	8.7
2	24.6	34.8	6.8
4	24.2	26.4	5.1
6	23.8	22.4	4.0
8	23.9	21.0	3.8
10	24.0	20.5	3.8
12	24.2	20.3	3.85
14	24.3	20.3	3.85
16	24.4	20.3	3.85
18	24.4	20.3	3.85
22	24.7	20.1	3.85
25	24.9	19.9	3.8
30	25.1	19.8	3.8
35	25.4	19.6	3.85
40	25.4	19.5	3.85
45	25.4	19.5	3.85
50	25.6	19.4	3.9
55	25.7	19.4	3.9
60	25.8	19.3	3.9
65	25.9	19.3	3.9

Flujo agua parrilla refrigerante : 108.3 ml/s

Compuerta 2 : Posición A (abierta)

66	25.9	19.3	3.9
67	25.8	19.3	3.9
68	25.8	19.3	3.9
70	25.7	19.4	3.9
75	25.8	19.3	3.9
81	26.0	19.2	3.95
110	26.4	19.0	3.95
115	26.4	18.9	3.9

Continúa.....

Continuación :

Cerrando flujo de agua para luego instalar  
agua en la parrilla refrigerante y radiador,  
nuevo flujo de agua : 102.6 ml/s

Compuerta 2 : Posición A (abierta)

123	25.0	20.8	4.0
125	24.7	20.8	3.9
130	24.4	20.8	3.9
135	24.4	20.8	3.9
140	24.4	20.7	3.88
185	24.4	20.6	3.88

Flujo de agua en la parrilla refrigerante y  
radiador : 102.6 ml/s

Compuerta 2 : Posición B (1/2 abierta)

186	24.4	20.2	3.85
187	24.5	21.0	3.95
188	24.6	20.9	3.95
191	24.7	20.7	3.9
196	24.9	20.5	3.97
201	24.9	20.5	4.0

Flujo de agua en la parrilla refrigerante y  
radiador : 102.6 ml/s

Compuerta 2 · Posición C (Cerrada)

203	25.0	23.3	4.4
204	25.2	24.9	4.8
208	25.3	28.4	5.5
212	25.4	30.4	6.05

b.6 Evaluación del equipo con carga (recipiente con agua hirviendo), funcionando el ventilador y controlando el deshumecedor con el control automático electrónico

- 1) Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto  
taire : 30°C; regulada con el Variac  
Øaire : 30 %; voltaje de referencia en el control automático : 0.3 V  
Compuerta 2 : Posición A (abierta)

$\theta$ (min)	t (°C)	Ø (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	32.2	30.4	9.2
1	33.7	75.0	24.8
2	33.5	74.2	24.5
5	32.2	66.1	20.0
6	31.8	64.7	18.8
10	30.8	61.3	17.2
11	30.5	60.9	16.5
13	30.3	60.0	16.2
15	30.0	59.4	15.8
16	29.9	59.2	15.5
18	30.1	57.1	15.2
20	30.0	55.7	14.8
22	29.9	52.4	13.3
25	30.0	43.6	11.5
27	29.9	39.4	10.3
30	30.0	35.7	9.3
32	30.0	34.1	9.0
38	30.0	31.2	8.2
40	29.9	30.4	7.1
42	29.9	29.8	7.7

Volumen inicial de agua : 2032 ml

Volumen de agua al alcanzar  $\theta=30\%$  : 1725 ml

Volumen de agua captado : 307 ml

Nota : En este caso como se ha trabajado con temperatura del aire de 30°C, no se ha hecho circular agua refrigerante.

- 2) Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto  
taire : 29 °C; regulada con el Variac  
Øaire : 20 % ; voltaje de referencia : 0.2 V  
Compuerta 2 : Posición A (abierta)

θ (min)	t (°C)	Ø (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	29.6	24.0	6.1
1	29.6	41.3	10.5
5	29.4	32.6	8.3
10	29.2	27.2	6.8
18	29.0	24.2	6.0
24	28.9	23.1	5.8
29	28.8	22.7	5.4

Peso depós. más agua hirviendo, inicial:588gr  
Peso depós. más agua para Ø=20%, final:551.5gr  
Volumen de agua captado : 68 ml

- 3) Vaire : 1 m/s; en el punto medio del ducto  
taire : 30 °C; regulada con el Variac  
Øaire : 22 % ; voltaje de referencia : 0.22V  
Compuerta 2 : Posición B (1/2 abierta)

θ (min)	t (°C)	Ø (%)	H ( $\frac{\text{gr agua}}{\text{kg a.s}}$ )
0	31.2	32.0	9.0
1	31.8	49.4	14.3
5	31.3	40.5	11.5
10	30.4	31.4	8.5
14	30.1	27.9	7.2
20	29.6	26.3	6.8
25	29.5	24.4	6.3
30	29.4	23.7	6.0
34	29.5	23.3	6.0
40	29.1	23.2	5.9
45	29.3	22.8	5.7

Peso depós. más agua hirviendo, inicial:609gr  
Peso depós. más agua para Ø=22%, final:559.6gr  
Volumen de agua captado : 76 ml

Nota : En los ensayos 2 y 3 no se ha hecho  
circular agua refrigerante.

- Segunda evaluación de resultados

Temperatura del aire de secado

Temperatura mínima	Condiciones de funcionamiento del equipo
24.5 °C	Funcionando 60 minutos el ventilador y el deshumedecedor; haciendo circular agua en el radiador y en la parrilla refrigerante. Velocidad del aire en el punto medio del ducto : 1 m/s . Ver ensayo b.4

- Humedad relativa del aire de secado

Humedad relativa mínima	Condiciones de funcionamiento del equipo
18.9 %	Funcionando 115 minutos el ventilador y el deshumedecedor; circulando agua en la parrilla refrigerante. Velocidad del aire en el punto medio del ducto : 1 m/s . Ver ensayo b.5

Velocidad del aire de secado

Rango de variación : 0 a 2.2 m/s

Distribución de velocidad : De las figuras 6.26, 6.27, 6.28, observamos que los perfiles de velocidad en las secciones A-A y B-B del ducto tienen la forma característica de un flujo turbulento; además es notable la mejora obtenida en cuanto a la simetría de los perfiles.

- Observaciones :

- . El mínimo valor de temperatura obtenido a condiciones normales de funcionamiento satisface el valor requerido de 25°C; habiendo influido en la obtención de este valor la instalación del radiador y el nuevo deshumedecedor.
- . Incrementando la temperatura se puede obtener aire con baja humedad relativa, del orden del

10%. Este es el caso de la primera evaluación (ensayo a.5), en el cual se obtuvo aire a 13.4% y 46.4°C (H:8.6 gr agua/kg a.s). Con la instalación del nuevo deshumecedor y a condiciones normales de funcionamiento se ha obtenido aire a 18.9% y 26.4°C (H:3.9 gr agua/kg a.s). Bajo condiciones más severas de funcionamiento (ensayo b.6), el rendimiento del nuevo deshumecedor es satisfactorio pues el valor de H mínimo logrado varía entre 5 y 7.

- La máxima velocidad del aire que se alcanza en el equipo es 2.2 m/s. Con este nuevo valor se satisface el valor requerido y se tendrá mayor facilidad y precisión en la regulación con la compuerta N°1.
- Los perfiles de velocidad logrados garantizan que en los ensayos el aire va a secar uniformemente al producto.
- Por los resultados obtenidos, la instalación definitiva de componentes del equipo es tal como se muestra en la figura 6.23.

#### 6.4.2 Ensayos de secado

##### 6.4.2.1 Curva de contenido de humedad de equilibrio

###### Instrumentos utilizados

- Sensor digital de humedad relativa  
marca : Higrotest

modelo : Testo 6400

fabricación : West Germany

rango :  $\emptyset$  : 0 - 100 % ; T : -199.9 - +199.9 °C

aproximación :  $\emptyset$  : 0.1 % ; T : 0.1 °C

- Horno eléctrico

marca : Memmert

fabricación : U.S.A.

rango de temperatura : 25 °C a 230 °C

- Balanza

marca : OHAUS SCALE CORPORATION

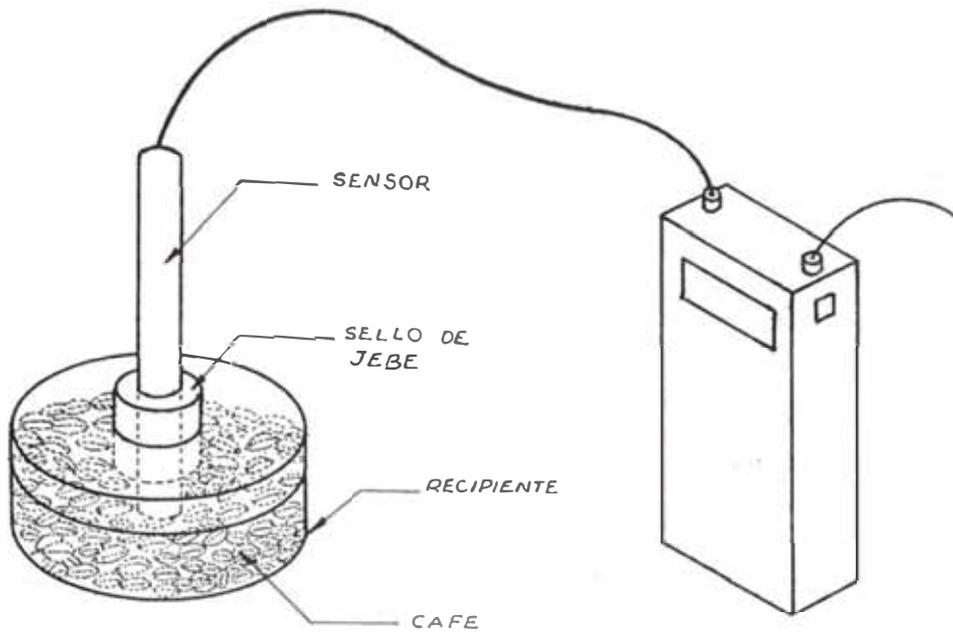
fabricación : U.S.A.

rango : 0 a 2610 gramos

aproximación : 0.1 g

### Procedimiento

Preparar un recipiente, que puede ser una probeta o un pequeño depósito de lata, de tal manera que cuando se coloque el sensor de humedad relativa pueda sellarse herméticamente. Se pesa una cantidad de producto húmedo (30 a 50 gr), se coloca en el recipiente, se cierra éste herméticamente y se espera hasta que la humedad relativa dentro del depósito llegue al equilibrio; se tiene de esta manera un punto de la curva de equilibrio. Para obtener los siguientes puntos se le extrae humedad al producto colocándolo en la cámara de secado del banco experimental, volviéndose a pesar y anotando la humedad relativa de equilibrio.



### Datos experimentales

Muestra : Café húmedo molido

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 36.5 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 22.06gr

$X_p = (m_h - m_s)/m_s$        $t$  : 20 °C

$m_h$ (gr)	$X_p$	$\emptyset$ (%)
36.5	0.654	90.0
34.1	0.545	92.0
32.6	0.477	88.5
30.4	0.378	82.5
28.4	0.287	82.0
27.3	0.237	76.0
26.2	0.187	69.0
25.4	0.151	64.0
24.4	0.106	51.0
23.8	0.078	44.0
23.4	0.060	23.5
23.3	0.056	18.0
22.4	0.015	19.0
22.4	0.015	3.0
22.4	0.015	5.0

#### 6.4.2.2 Curvas de secado

##### Instrumentos utilizados

- Sensor digital de humedad relativa  
marca : Higrotest

- modelo : Testo 6400  
fabricación : West Germany  
rango :  $\emptyset$  : 0 - 100 % ; T : -199.9 - +199.9 °C  
aproximación :  $\emptyset$  : 0.1 % ; T : 0.1 °C
- Anemómetro para flujos pequeños  
marca : Airflow Lufttechnik GmbH  
modelo : TA 400  
fabricación : West Germany  
rango : 0 - 2 m/s  
aproximación : 0.02 m/s
- Balanza  
marca : OHAUS SCALE CORPORATION  
fabricación : U.S.A.  
rango : 0 a 2610 gramos  
aproximación : 0.1 g
- Cronómetro :  
marca : Junghans  
fabricación : West Germany  
rango : 0 - 60 s  
aproximación : 1 s

### Procedimiento

Según las condiciones requeridas en el ensayo; encender el ventilador y establecer la velocidad del aire. La temperatura y la humedad relativa se fijan con el reóstato (Variac) y el control automático del deshumecedor respectivamente.

La muestra es previamente preparada de tal manera que el ensayo se lleve a cabo a las mismas condiciones que el secado a gran escala; así por ejemplo, el café y el cacao antes de ser secados son sometidos

a un proceso de fermentación.

Se pesa la muestra, se coloca en la bandeja o canastilla y se introduce en la cámara de secado; se empieza a contabilizar el tiempo y los datos experimentales se obtienen pesando el producto cada cierto tiempo. Cuando la muestra ya no disminuye más de peso es colocada en el horno eléctrico a una temperatura de 105 °C y por 24 horas, de esta manera se determina el peso de materia seca. (Ver pág.43 Ref.Nº 19)

#### Datos experimentales

##### a. Secado de cacao

Muestra :cacao

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 1975.7 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 855.0 gr

Parámetros del aire de secado : t : 50 °C  
Ø : 20 %  
Vm: 0.63 m/s

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	1975.7	1.31
0.5	1785.0	1.08
1.0	1760.0	1.05
1.5	1687.0	0.97
2.0	1549.0	0.81
2.5	1449.0	0.69
3.0	1354.0	0.58
3.5	1318.0	0.54
4.0	1253.0	0.46
4.5	1191.5	0.39
5.0	1153.0	0.34
6.0	1088.2	0.27
7.0	1041.5	0.21
8.0	9971.5	0.13
9.0	944.1	0.10
10.0	928.6	0.08
11.5	909.0	0.06
12.0	906.2	0.059
13.0	900.7	0.053
14.0	897.7	0.049
15.0	893.9	0.045

b. Secado de café a distintos valores de  $\phi_{\text{aire}}$

Muestra : café

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 50 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 24.11 gr

Parámetros del aire de secado : t : 50 °C  
Vm: 0.5 m/s  
 $\phi$  : 20 %

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	50	1.07
1.0	44.37	0.84
2.0	41.87	0.736
3.0	39.50	0.63
4.16	37.25	0.54
5.0	35.56	0.47
6.0	33.75	0.39
8.0	30.87	0.28
10.0	29.12	0.20
12.0	27.25	0.13
14.0	27.12	0.12
15.0	26.87	0.11

Muestra : granos de café

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 50 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 24.23

Parámetros del aire de secado : t : 50 °C  
Vm: 0.5 m/s  
 $\phi$  : 30 %

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	50.0	1.06
1.0	44.5	0.83
2.16	41.9	0.72
3.0	39.9	0.64
4.16	37.5	0.54
5.0	35.7	0.47
6.0	33.9	0.39
8.0	31.4	0.29
10.0	29.5	0.21
12.25	27.6	0.13
14.25	27.1	0.118
15.0	27.0	0.114

Muestra : granos de café

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 50 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 25.98 gr

Parámetros del aire de secado :  $t$  : 50 °C  
 $V_m$ : 0.5 m/s  
 $\phi$  : 40 %

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	50.0	0.92
1.16	46.62	0.79
2.0	45.12	0.73
3.0	43.25	0.66
4.0	41.68	0.60
5.16	39.62	0.52
6.16	37.25	0.43
8.42	34.0	0.30
10.0	31.87	0.22
12.0	30.37	0.16
14.16	29.50	0.13
16.0	29.25	0.12

Muestra : granos de café

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 50 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 26.47 gr

Parámetros del aire de secado :  $t$  : 50 °C  
 $V_m$ : 0.5 m/s  
 $\phi$  : 60 %

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	50.0	0.88
1.16	46.7	0.76
2.0	45.2	0.70
3.0	43.25	0.63
4.0	41.0	0.54
5.16	39.65	0.49
6.16	37.70	0.42
8.42	35.20	0.32
10.0	33.65	0.27
12.0	31.60	0.19
14.16	30.30	0.14
16.0	29.80	0.12

c. Secado de café a distintos valores de  $V_{\text{aire}}$

Muestra : granos de café

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 40 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 20.40 gr

Parámetros del aire de secado :  $t$  : 50 °C

$\phi$  : 30 %

$V_m$ : 0.25 m/s

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	40.0	0.96
1.0	37.0	0.81
2.0	35.6	0.74
3.0	34.2	0.67
4.0	33.0	0.61
5.0	31.6	0.54
6.0	30.5	0.49
7.0	29.3	0.43
8.0	28.5	0.39
9.0	27.8	0.36
10.0	27.0	0.32
11.0	26.3	0.28
13.0	24.9	0.22
15.0	23.7	0.16

Muestra : granos de café

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 50 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 25.5 gr

Parámetros del aire de secado :  $t$  : 50 °C

$\phi$  : 30 %

$V_m$ : 0.35 m/s

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	50.0	0.96
1.0	45.9	0.80
2.0	43.8	0.71
3.0	41.7	0.63
4.0	40.2	0.57
5.0	38.3	0.50
6.0	36.8	0.44
7.0	35.5	0.39
8.0	33.8	0.32
9.0	32.7	0.28
10.0	31.5	0.23
11.0	30.7	0.20
13.0	29.3	0.14
15.0	28.7	0.12

Muestra : granos de café

Peso de materia húmeda  $m_h$  : 50 gr

Peso de materia seca  $m_s$  : 23.6 gr

Parámetros del aire de secado : t : 50 °C

$\phi$  : 30 %

Vm: 1.4 m/s

$\theta$ (hr)	$m_h$ (gr)	$X_p$
0	50.0	1.11
1.0	43.7	0.85
2.0	40.3	0.70
3.0	38.7	0.63
4.0	36.5	0.54
5.0	34.5	0.46
6.0	32.0	0.35
7.0	30.8	0.30
8.0	29.4	0.24
9.0	27.9	0.18
11.0	26.7	0.13
13.0	26.5	0.12
15.0	25.9	0.09
16.0	25.9	0.09

### 6.4.3 Ensayos de caída de presión y medición de presión estática en distintos puntos del ducto principal

#### 6.4.3.1 Instrumentos utilizados

- Anemómetro para flujos pequeños  
marca : Airflow Lufttechnik GmbH  
modelo : TA 400  
fabricación : West Germany  
rango : 0 - 2 m/s  
aproximación : 0.02 m/s
- Manómetro inclinado  
marca : Dwyer  
modelo : N<sup>o</sup> 400  
fabricación : U.S.A.  
rango : 0 a 10 pulg.c.a.  
aproximación : 0.01 pulg.c.a.

- Balanza

marca : OHAUS SCALE CORPORATION

fabricación : U.S.A.

rango : 0 a 2610 gramos

aproximación : 0.1 g

#### 6.4.3.2 Procedimiento

Se preparan y se instalan los instrumentos de medición. La canastilla con la muestra, previamente pesada, debe colocarse en la cámara de secado; cuidando de tapar los espacios libres de los bordes por donde pueda pasar el aire.

La caída de presión se va midiendo para distintos valores de la velocidad del aire. Para anotar este dato se debe esperar a que la lectura en el manómetro inclinado se estabilize.

Para medir la presión estática manométrica en cualquiera de los puntos indicados en el esquema de la página siguiente, se mide con el manómetro inclinado dejando una de las ramas a la acción de presión atmosférica y la otra conectada al punto a medir.

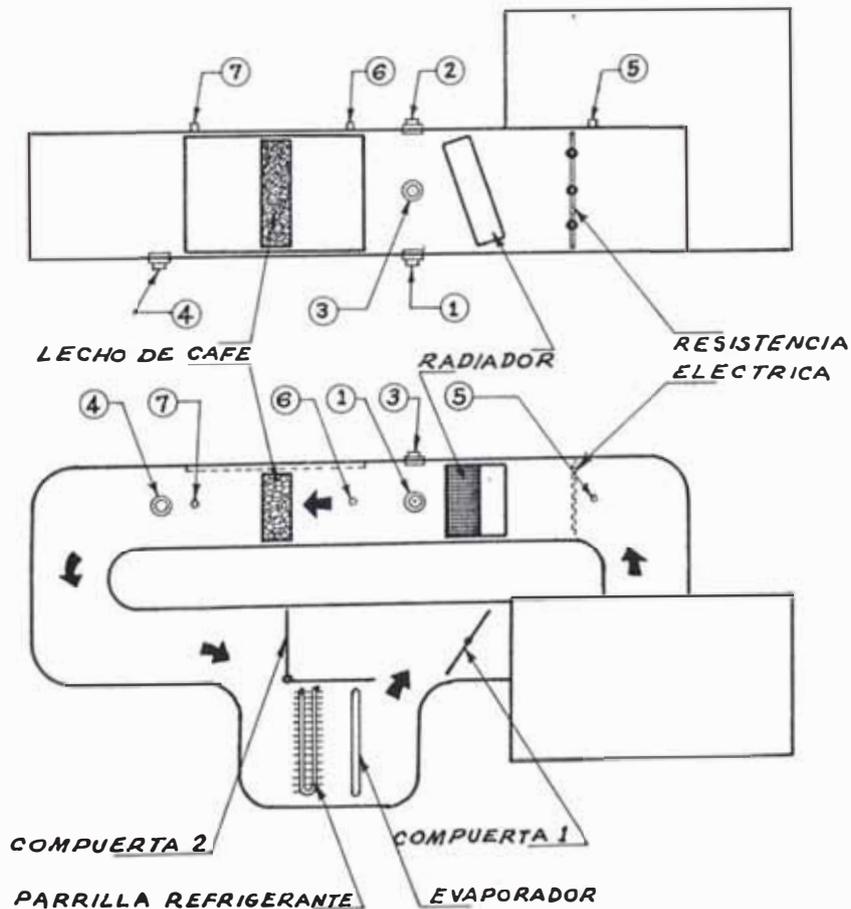
#### 6.4.3.3 Datos experimentales

a. Caída de presión en un lecho de granos de café

Muestra : granos de café seco

Peso de la muestra : 1100 gr

$Vm_1$ (m/s)	$h_{prod}$ (pulg.c.a)	$Vm_4$ (m/s)
0.09	0.025	0.09
0.13	0.043	0.16
0.16	0.050	0.18
0.19	0.075	0.19
0.22	0.085	0.19
0.26	0.110	0.26
0.29	0.130	0.26
0.32	0.145	0.26
0.35	0.190	0.32
0.39	0.185	0.35
0.42	0.245	0.39
0.45	0.255	0.42
0.48	0.275	0.45
0.52	0.300	0.45
0.55	0.350	0.52
0.58	0.380	0.55
0.61	0.480	0.39
0.65	0.520	0.55
0.71	0.580	0.55
0.78	0.690	0.58
0.85	0.780	0.68



gura 6.47 Esquema de ubicación de componentes y puntos de medición.

b. Presión estática manométrica en diferentes puntos del ducto principal del equipo

- Presión estática manométrica en el punto 5

$V_{m_1}$ (m/s)	hest <sub>5</sub> (pulg.c.a)
Evaluación con el lecho de granos	
0.49	+0.23
0.65	+0.37
Evaluación sin el lecho de granos	
0.98	+0.06
1.30	+0.10

Observación : La velocidad media de 0.98 m/s se alcanzó a partir de 0.65 m/s, al sacar el lecho de granos de la cámara de secado.

- Presión estática manométrica en el punto 6

$V_{m_1}$ (m/s)	hest <sub>6</sub> (pulg.c.a)
Evaluación con el lecho de granos	
0.49	+0.21
0.65	+0.31
Evaluación sin el lecho de granos	
0.20	0.00
0.32	0.00
0.65	-0.005
0.98	-0.010
1.30	-0.015
$V_{máx}$	-0.045

- Presión estática manométrica en el punto 7

$V_{m_1}$ (m/s)	hest <sub>7</sub> (pulg.c.a)
Evaluación con el lecho de granos	
0.49	-0.008
0.65	-0.120
Evaluación sin el lecho de granos	
0.98	-0.005

c. Caída de presión en el radiador y resistencia eléctrica ( $\Delta h_{5-6}$ )

$V_{m1}$ (m/s)	$\Delta h_{5-6}$ (pulg.c.a)
Evaluación sin el lecho de granos	
0.65	0.04
1.30	0.11

6.4.4 Ensayos complementarios

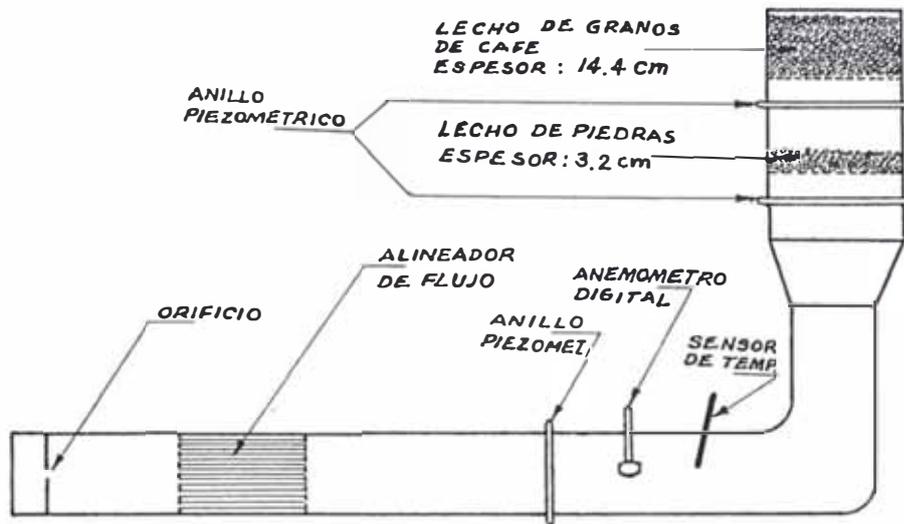
Se incluye en esta sección el ensayo para determinar la caída de presión del aire al atravesar un lecho de granos de café fresco (realizado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas, Facultad de Ingeniería Mecánica) y la evaluación de las propiedades del aire y su distribución de velocidad con la obtención directa de las curvas en el impresor puntual multicanal Linseis.

6.4.4.1 Caída de presión en un lecho de granos

Se utilizó en este ensayo el banco de pruebas construido para medir la caída de presión en lechos de piedras. Dicho equipo se halla en el Laboratorio de Máquinas Térmicas, Facultad de Ingeniería Mecánica U.N.I.

La velocidad del aire se midió con un sensor digital de velocidad (marca:Therm; modelo:2253-1) y la caída de presión con un manómetro de tubo en U. La ubicación de los instrumentos se muestran en el si-

guiente esquema :



Datos experimentales

Muestra : granos de café fresco

Espesor del lecho : 144 mm

V (m/s)	t (°F)	hprod (mm.c.a)
0.06	73.8	7
0.12	73.0	11
0.19	72.9	19
0.32	74.4	34
0.44	73.3	57
0.60	79.7	97
0.80	83.6	103
1.00	85.5	119
3.75	89.2	97
2.00	89.4	79

Muestra : granos de café seco

Espesor del lecho : 144 mm

V (m/s)	t (°F)	hprod (mm.c.a)
0.10	70.0	5.79
0.30	72.6	11.13
0.50	75.9	18.00
0.60	79.6	26.87
0.65	81.9	38.43
0.80	83.6	50.80
0.90	84.1	62.38
1.00	84.5	68.58
1.20	85.1	72.21
1.40	85.5	77.11

Nota : La caída de presión en el lecho de granos de café seco se ha medido con el manómetro inclinado, los valores obtenidos en pulgadas de columna de agua han sido convertidos a mm.c.a.

#### 6.4.4.2 Porosidad y diámetro esférico equivalente de los granos de café

Las mediciones se hacen en el laboratorio usando un recipiente de tubo plástico PVC de 6 pulgadas de diámetro y una probeta graduada. La porosidad E y el diámetro esférico equivalente de, se hallan con las ecuaciones 6.2 y 6.3.

$V_t$ (cm <sup>3</sup> )	$V_v$ (cm <sup>3</sup> )	$V_g$ (cm <sup>3</sup> )	N	de (cm)	
150.0	50.0	100.0	287	0.87	0.33
50.0	19.0	31.0	107	0.82	0.38
819.4	294.0	525.4	-	-	0.36

Valores promedio : de : 0.85 cm  
E : 0.36

#### 6.4.4.3 Propiedades del aire de secado y distribución de velocidades en el ducto obtenidas directamente en un impresor

En estos ensayos los resultados se obtienen graficados en el impresor puntual multicanal que es un aparato que recibe señales de los instrumentos de medición (en voltios) y los imprime en un papel de acuerdo a una escala previamente seleccionada.

El papel en el cual se imprimen los datos experimentales avanza a una velocidad constante escogida y permite obtener los datos graficados en periodos de tiempo que uno desee.

Así por ejemplo, si se desea saber como varia la humedad relativa con el tiempo y a distintas condiciones de funcionamiento del equipo, se conecta el sensor digital de humedad relativa al impresor, se escoge la velocidad del papel y la escala de la señal. Como el sensor que usamos emite señales en el rango de 0 a 1.09 V, se escoge la señal 1V siendo la equivalencia de voltaje y humedad relativa de 0 V a 0 % y 1.09 V a 100 %.

Los instrumentos utilizados son los sensores de Higrotest y Therm para la humedad relativa y temperatura respectivamente, detallados en 6.4.1.1 y el impresor puntual detallado en 4.2.2.

A continuación se presentan dos gráficos obtenidos en este impresor. En el primero se puede apreciar como varia la humedad relativa y temperatura del aire según las condiciones de funcionamiento del equipo. En el segundo gráfico se observa el perfil de velocidad del aire en el eje X-X del ducto principal, después de las correcciones señaladas en las figuras 6.22 y 6.23. Véase la forma simétrica del perfil.

## 6.5 Comparación de resultados

### 6.5.1 Parámetros del aire de secado

Parámetro	Valor <u>esperado</u>	Valor obtenido
Temperatura (°C)	25 a 80	24.5 a 46.4 <sup>(1)</sup> (Ensayos b.4, a.5)
Hum.relativa (%)	10 a 100	13.4 a 100 (Ensayo a.5)
Velocidad (m/s)	0 a 1.0	0 a 1.0 <sup>(2)</sup> (Figura 6.25)

### 6.5.2 Ensayos de secado

La comparación de los ensayos de secado lo haremos gráficamente, para una mejor visualización.

#### 6.5.2.1 Curvas de contenido de humedad de equilibrio

Comparando resultados esperados con resultados obtenidos; en la figura 6.53 puede observarse la semejanza entre la curva de contenido de humedad de equilibrio obtenida a 20°C en el banco experimental (figura 6.36) y la curva de equilibrio del café a 21°C, obtenida experimentalmente y según ecuación em

- 1) Es posible obtener el valor de 60°C, si se hace funcionar el equipo sin circular agua y con la resistencia en servicio. Limitación : temp. máx. operación motor: 60°C
- 2) Se obtiene velocidad de aire hasta 2.2 m/s, con la compuerta abierta.

pírica (figura 6.3), según referencia bibliográfica Nº 19.

Nótese la tendencia de la humedad de equilibrio de disminuir al aumentar la temperatura.

#### 6.5.2.2 Curvas de secado

Comparamos las curvas de secado de café y cacao en las figuras 6.54 y 6.55.

Como vemos, las curvas en ambos casos se semejan pero no son idénticas, debido a las diferentes condiciones en las operaciones de secado; así por ejemplo el tipo de soporte de material y la velocidad del aire de secado que en la referencia bibliográfica no se precisan.

#### 6.5.3 Caída de presión del aire en un lecho de granos

En la figura 6.56, observamos que la curva experimental difiere de la obtenida con ecuación teórica.

Sin embargo, vemos que las curvas difieren más, a mayor velocidad del aire y como las operaciones de secado a gran escala se realizan con velocidades del aire menores a 0.5 m/s (en este rango la diferencia de valores es mínima) para fines de cálculo la ecuación en mención puede usarse con suficiente aproximación.

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

1. Las condiciones del aire de secado que pueden lograrse en el banco experimental son las siguientes :

1.1 Temperatura : 24.5 a 60 °C

1.2 Humedad relativa : 13.4 a 100 %

1.3 Velocidad : 0 a 2.2 m/s, con perfil de velocidad uniforme.

2. La capacidad de extracción de agua del equipo, para condiciones constantes del aire de secado es :

0.43 Lt/hr, para 30 °C, 30 %, 1 m/s

0.14 Lt/hr, para 29 °C, 20 %, 1 m/s.

La capacidad se reduce a 0.10 Lt/hr, para 30 °C, 22 % , 1 m/s, teniendo 1/2 abierta la compuerta de desviación de flujo de aire hacia el deshumecedor.

3. Al abrir la puerta del equipo, estando éste funcionando, la temperatura y humedad relativa del aire varían poco por tanto al manipular las muestras para pesarlas no se afectan las condiciones del ensayo.

4. El funcionamiento del ventilador solo, produce en el aire, por disipación de calor del motor, un proceso de calentamiento sensible sin variación del contenido de humedad.
5. El equipo se ha probado en condiciones de funcionamiento continuo, por tanto pueden realizarse pruebas que requieran prolongado tiempo de secado.
6. Por no contar el equipo con recubrimiento de material aislante térmico, una fuerte corriente de aire que pase sobre el equipo varían significativamente los valores de temperatura y humedad relativa del aire de secado. En consecuencia, durante los ensayos no debe abrirse las ventanas del laboratorio.
7. A condiciones constantes de dos parámetros del aire de secado, la velocidad de secado aumenta :
  - 7.1 Al aumentar la temperatura del aire
  - 7.2 Al aumentar la velocidad del aire
  - 7.3 Al disminuir la humedad relativa del aire.
8. Las curvas de secado obtenidas en el banco experimental se semejan a las curvas de materiales similares obtenidas con ecuaciones empíricas o experimentalmente en la referencia bibliográfica Nº 19.
9. En los ensayos de secado se debe procurar la mayor semejanza con las condiciones previstas para la operación en gran escala.

- . La humedad de equilibrio disminuye al aumentar la temperatura. Por tanto, se debe determinar las curvas de equilibrio a distintas temperaturas a fin de tener un conocimiento cabal de la operación de secado.
11. La caída de presión es mayor en los lechos de productos frescos o húmedos que en los lechos de productos secos, referidos a un mismo material.
12. Los valores teóricos de caída de presión obtenidos con las ecuaciones 5.7, 5.8, 5.8.a, son los que mas se aproximan a los valores experimentales, por tanto deben emplearse para cálculo/diseño de equipos similares.
13. La importancia del presente trabajo, radica en el hecho de haber construido un equipo en el cual se pueden realizar ensayos de resultados confiables, relativos a procesos de secado de muestras representativas de hasta 2 kg de producto. Prueba de ello son las curvas de secado de orégano obtenidas en el equipo, con buenos resultados prácticos, según se muestra en el apéndice G.2.
14. La teoría del secado y los conceptos desarrollados en el diseño del banco experimental son aplicables a la electrotecnia, en el secado de transformadores por calentamiento externo mediante aire caliente.
15. La metodología de cálculo desarrollada en el diseño del banco experimental y ampliada en el apéndice F.1, son aplicables al diseño de cualquier secador en el que el secado sea por contacto directo del producto con una corriente de aire.

## BIBLIOGRAFIA

1. Heat Exchangers : Design and Theory Source Book
  - N. Afgan and E.U. Schliinder
  - Mc Graw Hill Book Company, Edición 1974.
2. Drying Cereal Grains
  - Donald B. Brooker - Dona Fred W. Bakker - Arkema
  - Carl W. Hall, Edición Sept. 1973.
3. British Standards Institution
  - B.S. 1042. Part 1, 1964.
4. Handbook of Air Conditioning System Design
  - Carrier Air Conditioning Company
  - Mc Graw Hill Book Company, Edición 1965
5. Mediciones en Ingeniería
  - C. V. Collett - A.D. Hope
  - Ed. Gustavo Gili S.A, Barcelona 1976.
6. Termodinámica Aplicada
  - J. F. Cruz - J. A. Postigo
  - UNI DEM, Lima Perú 1978.
7. Solar Engineering of Thermal Processes
  - John A. Duffie - William A. Beckman
  - John Wiley & Sons Co, 1980.
8. Principios de Operaciones Unitarias
  - Alan S. Foust - Leonard A. Wensel - Curtis W. Clump
  - Compañía Editorial Continental S.A, México 1978.
9. Heat Exchanger Design
  - Arthur P. Fraas - M. Necati Ozisik
  - John Wiley & Sons, Inc, N.Y. London Sydney 1965.
10. Devices for Food Drying State of Technology Report on Intermediate Solutions for Rural Application
  - Arbeitsgemeinschaft für Entwicklungsplanung (AE)
  - Study Group for Development Planing Ltd
  - German Appropriate Technology Exchange (GATE), 1979.
11. Air Conditioning Engineering
  - W. P. Jones
  - Edic. Edward Arnold, 1973.
12. Solar Energy Handbook
  - Jan F. Kreider - Frank Kreith
  - Mc Graw Hill Book Company, Edición 1981.

13. Principios de Transferencia de Calor  
- Frank Kreith  
- Ed. Herrero Hermanos, Sucesores S.A, 1970
14. Manual del Ingeniero Mecánico  
- Marks - T. Baumeister - E. Avallone  
- Mc Graw Hill Book Company, Edición 1982.
15. Manual del Ingeniero Químico  
- John H. Perry  
- Mc Graw Hill Book Company, Edición 1956
16. Principles of Grain Drying  
- Roberto Rengifo  
- First Latin American School and Third International Symposium on Non Conventional Energy, Bogotá 1982.
17. Teoría del Secado Solar - Una Recopilación y Evaluación de la Bibliografía Internacional Sobre la Teoría de Secado Solar  
- Informe Técnico P.S.S - 04, Febrero 1984.
18. Experiments with Mixed Type Solar Driers  
- Roberto Román L. - Claudio Mc Auliffe C. - Ovalle  
- Departament of Mechanical Engineering University of Chile, 1983.
19. Secagem e Armazenamento de Produtos Agropecuarios com Uso de Energia Solar e Ar Natural  
- Silvio José Rossi - Gonzalo Roa  
- Academia de Ciencias do Estado de Sao Paulo Publicao ACIESP Nº 22, 1980
20. Mecánica de los Fluidos  
- Victor L. Streeter  
- Mc Graw Hill Book Company, Edición 1966
21. Elementary Fluid Mechanics - Fifth Ed. SI Version  
- John K. Vennard - Robert L. Street  
- John Wiley & Sons, Inc.
22. Elementos de Ingeniería Química. Operaciones Básicas  
- Angel Vian - Joaquín Ocón  
- Ediciones Aguilar, 1979.
23. Industrial Drying  
- A. Williams - Gardner  
- Leonard Hill, London 1971.
24. Manual de Termodinámica  
- Ediciones J.A. Ragas Miranda, 1978