

T-UES  
1506  
C957d  
2000  
Ej. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
INGENIERIA QUIMICA



**Diseño y construcción de un secador por lotes de tipo charolas con circulación transversal, para ser utilizado como instrumento de enseñanza en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador.**

PRESENTADO POR

FREDDY ALEXANDER CRUZ HENRIQUEZ

JUAN ANTONIO MENDEZ CALIXTO *- Lebe*

FRANCISCO ARTURO SOTO AGUILAR *- Lebe*

*15100976*

PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO

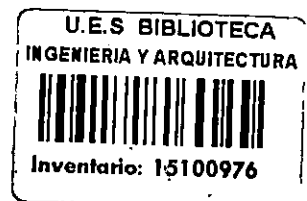
*15100976*

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DEL 2000



*4827*

*Recebid el 15 marzo 2000*



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTORA : DRA. MARÍA ISABEL RODRÍGUEZ**

**SECRETARIA GENERAL: LICDA. LIDIA MARGARITA MUÑOZ VELA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**DECANO : ING. ALVARO ANTONIO AGUILAR ORANTES**

**SECRETARIO : ING. SAÚL ALFONSO GRANADOS**

**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**



**DIRECTORA : ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

**Trabajo de Graduación previo a la opción de:  
INGENIERO QUIMICO**

**Título:**

**Diseño y construcción de un secador por lotes de tipo charolas con circulación transversal, para ser utilizado como instrumento de enseñanza en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador.**

**Presentado por:**

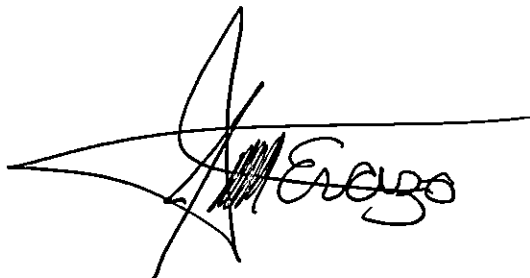
**FREDDY ALEXANDER CRUZ HENRIQUEZ  
JUAN ANTONIO MENDEZ CALIXTO  
FRANCISCO ARTURO SOTO AGUILAR**

**Trabajo de Graduación aprobado por:**

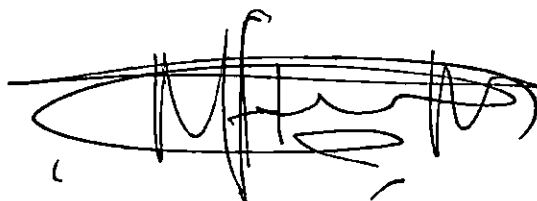
**COORDINADOR: ING. JOSÉ ANÍBAL ERAZO CORNEJO  
ASESOR : ING. MIGUEL FRANCISCO AREVALO MARTÍNEZ  
ASESOR : ING. JUAN RODOLFO RAMÍREZ GUZMÁN**

**SAN SALVADOR, MARZO DEL 2000**

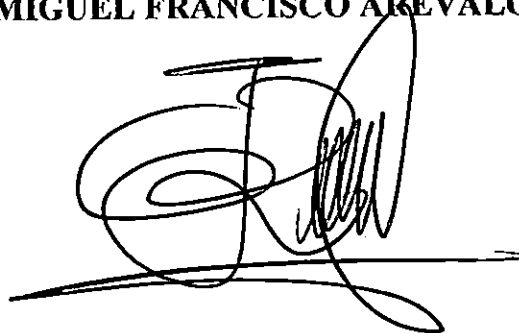
**Trabajo de Graduación aprobado por:**



**COORDINADOR : ING. JOSÉ ANÍBAL ERAZO CORNEJO**



**ASESOR : : ING. MIGUEL FRANCISCO AREVALO MARTÍNEZ**



**ASESOR : ING. JUAN RODOLFO RAMÍREZ GUZMÁN**

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para la realización de este proyecto.

Particularmente fue apreciable la colaboración de Industrias Mecánicas 2000 en especial al Sr. Felix Antonio Cruz Campos, por su disponibilidad e interés en la construcción de los secadores al nivel de laboratorio y planta piloto. Deseamos agradecer también a los Sres. Martín Antonio González y Adrián Sagastume por construirnos los sistemas de control de calor y de flujo de aire respectivamente; al Sr. René Meléndez por su valiosa colaboración durante el desarrollo del proyecto; al Sr. Francisco Aguirre, Sr. Ricardo Aguirre por el diseño de los diagramas eléctricos y distribución en planta de los secadores y a nuestros asesores Ing. José Aníbal Erazo, Ing. Francisco Arevalo e Ing. Juan Rodolfo Ramírez, por su paciencia y tiempo, así como sus certeras orientaciones.

## DEDICATORIA

A DIOS POR HABERME CREADO

A GSA POR HABERME GUIADO

A MIS PADRES POR HABERME APOYADO

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS POR HABERME AGUANTADO

A MIS HERMANAS Y NOVIA POR HABERME INSPIRADO

FREDDY CRUZ

## DEDICATORIA

IN MEMORIAM de Ing. FRANCISCO ANTONIO MENDEZ CARCAMO

Particularmente a mi madre Angela

A mis hermanos

A Carina

A mis compañeros de tesis, por tener la dicha de trabajar con ellos pese a las adversidades.

A mis grandes amigos: Manuel Gallo, Cesar Reyes, Tania Torres, René Meléndez, Ricardo Olmedo, Daniel Mejía, Aníbal Erazo, Juan Ramírez, Gustavo Berrios, Byron, Hector.

A Kike (Q.D.D.G)

A todas aquellas personas que hicieron más alegre este proyecto

Antonio Méndez

## DEDICATORIA

A:

Dios Todopoderoso

Por ser la luz en mi camino, dándome la fortaleza necesaria en los momentos más difíciles para alcanzar este peldaño en mi vida.

María Auxiliadora

Por ser la fuente de inspiración en cada paso, ya que me mostró su bondad de madre.

Mis Padres, Francisco Arturo y Concepción Nelly

Por haberme brindado su amor, comprensión y apoyo en mis estudios; y a quienes especialmente dedico este triunfo alcanzado.

Mis Hermanos, Oswaldo Ernesto, Verónica Irene y Yanira Del Carmen

Por haberme soportado y ayudado en el desarrollo de este trabajo con su incondicional apoyo y comprensión.

Mi esposa, Elsa Marisol

Al mostrarme que el amor no son palabras si no hechos, gracias por su comprensión y espera.

Mis Hijas, Nelly Aracely, Erika Marisol y ?

Por ser la motivación de mi vida siempre.

Mis amigos: Juan Antonio, Freddy Cruz, Manuel Gallo, Daniel Mejía, Juan Ramírez, Francisco y Ricardo Aguirre, Kike(Q.D.D.G.), Roberto Villalobos y muchos mas, quienes me animaron y acompañaron en todo momento con especial agradecimientos.

FRANCISCO ARTURO



## RESUMEN

La finalidad de este trabajo, es el diseño y construcción de un secador de bandejas al nivel de planta piloto, para ser utilizado como instrumento de enseñanza en los laboratorios de las asignaturas de Operaciones Unitarias III, Balances de Materia y Energía y para investigaciones de cualquier índole relacionado con el secador de sólidos.

El secador al nivel de planta piloto fue construido a partir de parámetros obtenidos en un secador al nivel de laboratorio, el cual está diseñado que puedan controlarse las variables involucradas en el proceso de secado tales como: temperatura de secado ( $T$ ), velocidad del aire ( $v$ ), tiempo de secado ( $\theta$ ), Pérdida de peso del material sometido ( $W$ ) y el espesor del sólido ( $H$ ).

El rango de temperatura que maneja el secador al nivel de laboratorio oscila entre 30 y 80°C. La pérdida del peso del material está controlada mediante una balanza granataria colocada en la parte superior, la velocidad del flujo de aire está controlada por medio de un motor eléctrico con 2 niveles de velocidad (5.92 y 6.74 m/s) y los espesores de lecho (bandeja) seleccionados es el parámetro básico para la determinación de las curvas de secado y la cantidad de materia prima a utilizar, la cual está controlada por 4 bandejas de 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0 cm de espesor.

Los materiales seleccionados sometidos al proceso de secado fueron tres: Silica Gel, Cebolla y Cilantro; tal como se describe en el capítulo 3.0, los cuales tienen en consideración las características de los materiales que se manejan en los secadores de bandeja, el cual es presentado en la sección 1.2.

Para la selección de los materiales se hicieron pruebas preliminares que son críticas en el proceso de secado, las pruebas se basaron en aspectos cualitativos y la forma física de la materia prima tales como: consistencia del material seco, desprendimiento de líquidos orgánicos, corrosión, contenido de humedad de los materiales y la descomposición por reacciones enzimáticas que sufren algunos materiales

En la sección 3.3 se da una caracterización física, química y biológica de los materiales sometidos a secado al nivel de laboratorio para conocer la naturaleza de los sólidos, que dieron la pauta para la determinación de las curvas de secado que fue la base para el escalamiento.

Para la silica gel se trabajo con 4 niveles de temperatura (40,50,60 y 70°C), 4 niveles de espesor (1.0, 1.5, 2.0 y 3.0 cm) y 2 niveles de velocidad (5.92 y 6.74 m/s), tomando en cuenta que el nivel de temperatura no sobrepase los 90°C para evitar la degradación del grano, dadas en el cuadro 3.2. En el caso de la cebolla, se trabajo con 3 niveles de temperatura (45, 50 y 55°C), 2 niveles de espesor (1.0 y 1.5 cm) y 2 niveles de velocidad (5.92 y 6.74 m/s), considerando que la temperatura máxima permisible de secado no exceda los 60°C, tal como se muestra en el cuadro 3.3. Para el cilantro los niveles de operación fueron: 2 niveles de temperatura (40 y 45°C), 2 niveles de espesor (1.0 y 1.5 cm) y 2 niveles de velocidad (5.92 y 6.74 m/s), siempre y cuando la temperatura máxima permisible de secado no exceda los 48°C, tal como se presenta en le cuadro 3.4.

Los resultados del monitoreo para cada uno de los materiales son presentados en el anexo V, en base a ello se construyeron las curvas de humedad (X) vrs tiempo ( $\theta$ ) para cada uno de los niveles seleccionados de los materiales. Estos son mostrados en las figuras 5.4 y 5.5. Estas curvas fueron correlacionadas mediante un modelado empírico que sirvió para la obtención de las curvas de velocidad de evaporación (N) vrs humedad (X) presentadas en la figuras 5.10 y 5.11.

Para el escalamiento del secador al nivel piloto, se simularon las misma condiciones que operaron en el secador al nivel de laboratorio.

La base para el escalamiento fue la silica gel por ser un material higroscópico, de los cuales se utilizaron los parámetros obtenidos al nivel de laboratorio (T,  $\theta$ , v, H y las curvas de secado).

Para el diseño del secador piloto se estimó el espaciado de bandeja en arreglo paralelo, dado en la sección 5.5. Este consta de 3 pares de bandejas cuyas dimensiones son de 30 x 23 cm, con espesores de 1.5, 2.0 y 3.0 cm. La velocidad del aire esta regulada por un motor de 1/3 HP a 1080 rpm, generando una velocidad de aire aproximada de 8.7 m/s.

La entrada de aire se regula por medio de una ventana de celosías de aluminio ubicadas en la parte inferior y la salida del mismo esta colocada en la parte superior por medio de una compuerta de movimiento longitudinal.

La generación y control del sistema de calor esta controlada por medio de un regulador de temperatura que trabaja de 0 a 400°C. El sistema de calentamiento consta de 2 resistencia de 2750 watt de potencia cada una.

En el capítulo 7.0 se presenta los manuales de operación y mantenimiento de los secadores construidos, para facilitar el manejo y cuidado de los mismos.

Como un apoyo para la asignatura de Operaciones Unitarias III, el capítulo 2.0 presenta la teoría fundamental concerniente al secado por lotes, en el cual los catedráticos y estudiantes pueden utilizarlo como guión de clase para facilitar la enseñanza. Además se presenta detalladamente los métodos y cálculos matemáticos involucrados en cada periodo de secado (ajuste, constante y decreciente) cuando se realiza simultáneamente los mecanismos de transferencia de calor y masa. Estos últimos fueron importantes para la predicción de parámetros que sirvieron para la realización del escalamiento del nivel de laboratorio al nivel piloto.

## INDICE

CONTENIDO	Pags
<b>INTRODUCCION</b>	1
<b>1.0 GENERALIDADES DEL SECADO DE SOLIDOS</b>	3
1.1 SISTEMAS DE CONTACTO GAS – SOLIDO	3
1.1.1 ESTÁTICO	3
1.1.2 MÓVIL	4
1.1.3 FLUIDIFICADO	5
1.1.4 DILUIDO	6
1.2 CLASIFICACION DE LOS SECADORES.	9
1.2.1 CLASIFICACION BASANDOSE EN EL METODO DE TRANSFERENCIA DE CALOR	9
1.2.1.1. <i>Secadores directos.</i>	9
1.2.1.2. <i>Secadores indirectos.</i>	10
1.2.1.3. <i>Secadores que utilizan energía radiante y/o dieléctrica.</i>	11
1.2.2 CLASIFICACION POR LAS CARACTERISCAS DE DE MANEJO Y PROPIEDADES FISICAS DEL MATERIAL MOJADO	12
1.3 EQUIPOS DE SECADO	13
1.3.1 POR LOTES.	13
1.3.1.1. <i>Secadores de bandejas.</i>	13
1.3.1.2. <i>Secadores de Bandejas por circulación directa.</i>	16
1.4 APLICACIÓN DE LA PSICROMETRIA A LAS OPERACIONES DE SECADO.	21
1.4.1 HUMEDAD ABSOLUTA	22
1.4.2 HUMEDAD DE SATURACIÓN	22
1.4.3 TEMPERATURA DE BULBO SECO.	23

1.4.4	HUMEDAD RELATIVA . . . . .	23
1.4.5	PORCENTAJE DE HUMEDAD ABSOLUTA . . . . .	24
1.4.6	TEMPERATURA DE ROCÍO .. . . .	24
1.4.7	VOLUMEN HÚMEDO . . . . .	25
1.4.8	CALOR HÚMEDO . . . . .	26
1.4.9	ENTALPÍA . . . . .	27
1.4.10	CURVAS DE SATURACIÓN ADIABÁTICA Y TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO . . . . .	29
<b>2.0</b>	<b>FUNDAMENTOS DE SECADO.</b> . . . . .	<b>32</b>
2.1	OBJETIVO DE SECADO. . . . .	33
2.2	TERMINOLOGIA . . . . .	34
2.2.1	HUMEDAD DE EQUILIBRIO ( $X^*$ ). .. . . .	36
2.2.2	AGUA LIGADA ( $X_{LI}$ ) Y NO LIGADA ( $X_{NLI}$ ) EN LOS SÓLIDOS. . . . .	38
2.2.3	HUMEDAD LIBRE ( $X_L$ ) . . . . .	39
2.3	CONDICIONES GENERALES PARA EL SECADO . . . . .	41
2.3.1	VELOCIDAD DE SECADO POR LOTES . . . . .	42
2.3.2	PRUEBAS DE SECADO . . . . .	42
2.3.3	PERIODOS DE SECADO . . . . .	43
2.3.3.1.	<i>Periodo inicial o de ajuste</i> . . . . .	45
2.3.3.2.	<i>Periodo de secado constante</i> . . . . .	46
2.3.3.3.	<i>Periodo decreciente</i> . . . . .	48
2.3.4	MÉTODOS DE CALCULO PARA EL PERIODO DE SECADO CONSTANTE. . . . .	51
2.3.4.1.	<i>Método de curva de secado</i> . . . . .	51
2.3.4.2.	<i>Método de predicciones de coeficientes de transferencia de masa y calor</i> . . . . .	52

2.3.5	MÉTODO DE CALCULO PARA EL PERIODO DE SECADO DECRECIENTE	59
2.3.5.1.	<i>Método que emplea una integración gráfica.</i>	59
2.3.5.2.	<i>Método utilizando ecuaciones basadas en difusión y movimiento capilar</i>	60
2.3.6	EFFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO SOBRE EL PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE	63
2.3.6.1.	<i>Efecto de la velocidad del aire</i>	63
2.3.6.2.	<i>Efecto de la humedad del gas</i>	63
2.3.6.3.	<i>Efecto de la temperatura del gas</i>	64
2.3.6.4.	<i>Efecto del espesor del lecho del sólido que se esta secando</i>	64
2.3.6.5.	<i>Efecto de la contracción</i>	64
<b>3.0</b>	<b>SELECCIÓN DE MATERIALES SOMETIDOS A SECADO AL NIVEL DE LABORATORIO</b>	<b>66</b>
3.1	GENERALIDADES DE LA MATERIA PRIMA SELECCIONADA	66
3.2	SELECCIÓN DE LOS MATERIALES QUE SERAN SOMETIDOS A SECADO	68
3.3	CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES SOMETIDOS A SECADO	72
3.3.1	SILICA GEL	72
3.3.2	CEBOLLA	74
3.3.3	CILANTRO	77
<b>4.0</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO AL NIVEL DE LABORATORIO</b>	<b>79</b>
4.1	GENERALIDADES	79
4.2	SISTEMA DE SOPORTE Y CARCAZA	81
4.3	SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DE LA VELOCIDAD DE FLUJO DE AIRE	83

4.4	SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DE CALOR	89
4.4.1	ESPECIFICACIONES DE LAS RESISTENCIAS	89
4.5	SISTEMA MEDICION DE TEMPERATURA	93
4.6	SISTEMA DE MEDICION DE PESO	94
<b>5.0</b>	<b>METODOLOGIA DE LA EXPERIMENTACION</b>	<b>96</b>
5.1	DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL	96
5.1.1	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	96
5.1.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	96
5.1.3	OBTENCIÓN DE CURVAS DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO	97
5.1.4	OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL SECADOR PILOTO	102
5.1.4.1	<i>Identificación de variables involucradas en el proceso</i>	103
5.1.4.2	<i>Mecanismo de la experimentación</i>	105
5.2	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL	109
5.2.1	DETERMINACIÓN DE CURVA DE SECADO	109
5.2.2	MODELADO EMPÍRICO DE LOS RESULTADOS	110
5.2.3	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN	123
5.3	CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO FINAL	136
5.3.1	CONTRACCIÓN	136
5.3.2	UNIFORMIDAD DE LA HUMEDAD FINAL	136
5.4	REPORTE DE RESULTADOS	138
5.5	ESCALAMIENTO DEL SECADOR AL NIVEL PILOTO	140
<b>6.0</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADOR AL NIVEL DE PLANTA PILOTO</b>	<b>146</b>
6.1	GENERALIDADES	146
6.2	SISTEMA DE SOPORTE Y CARCAZA	147

6.3 SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DEL FLUJO DE AIRE . . . . .	149
6.4 SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DE CALOR . . . . .	152
6.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE BANDEJAS . . . . .	155
<b>7.0 MANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO . . . . .</b>	<b>156</b>
7.1 MANUAL DE OPERACIÓN DEL SECADOR AL NIVEL DE LABORATORIO . . . . .	156
7.1.1 CALIBRACIÓN DEL SECADOR AL NIVEL DE LABORATORIO. . . . .	157
7.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL SECADOR AL NIVEL DE LABORATORIO . . . . .	163
7.2.1. MANTENIMIENTO PREVENTIVO . . . . .	163
7.2.2. MANTENIMIENTO CORRECTIVO . . . . .	164
7.3 MANUAL DE OPERACIÓN DEL SECADOR AL NIVEL DE PLANTA PILOTO. . . . .	165
7.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL SECADOR AL NIVEL PLANTA PILOTO . . . . .	167
7.4.1. MANUAL PREVENTIVO . . . . .	167
7.4.2. MANUAL CORRECTIVO . . . . .	167
<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>169</b>
<b>RECOMENDACIONES . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS . . . . .</b>	<b>174</b>
<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>177</b>
ANEXO I.	
Clasificación de secadores comerciales basados en transferencia de calor y propiedades físicas de los materiales mojados. . . . .	178



ANEXO II.	
Cartas psicrométricas aire – agua . . . . .	182
ANEXO III	
Emisividades normales de diversas superficies. . . . .	185
ANEXO IV	
Planos del secador al nivel de laboratorio. . . . .	186
ANEXO V	
Datos obtenidos de la silica gel y cebolla en los ensayos efectuados al nivel de laboratorio. . . . .	189
ANEXO VI	
Planos del secador al nivel de planta piloto. . . . .	230

## INDICE DE CUADROS

Nº TITULO DE CUADRO	Pags
3.1 Tamaños de partícula de la silica gel comercial . . . . .	73
3.2 Propiedades físicas de la silica gel seca. . . . .	74
3.3 Propiedades químicas y físicas de la cebolla . . . . .	76
3.4 Propiedades físicas y químicas del cilantro . . . . .	78
4.1 Velocidades de flujo de aire medidas por medio del rotómetro. . . . .	84
4.2 Datos para encontrar la estimación de la velocidad del flujo de aire . . . . .	87
4.3 Resultados de la estimación de la velocidad del flujo del aire . . . . .	87
4.4 Comparación de la velocidad medida por el rotámetro y la ecuación de Bernoulli. . . . .	88
4.5 Lecturas de corriente por medio de voltamperímetro de los termostatos	91
4.6 Dimensiones de las bandejas. . . . .	95
5.1 Datos obtenidos del contenido de humedad de equilibrio para la silica gel	100
5.2 Datos obtenidos del contenido de humedad de equilibrio para la cebolla.	100
5.3 Datos de operación para obtención de curvas de secado . . . . .	106
5.4 Resultados obtenidos en la determinación del modelado empírico para silica gel a $T=40^{\circ}\text{C}$ , $v=5.92\text{m/s}$ y $H= 1.5\text{ cm}$ . . . . .	120
5.5 Modelado empírico, correlacionando los datos calculados de $X$ vrs $\theta$ en TBLCURVE, para la Silica Gel . . . . .	124
5.6 Modelado empírico, correlacionando los datos calculados de $X$ vrs $\theta$ en TBLCURVE, para la Cebolla . . . . .	126
5.7 Valores obtenidos de velocidad de evaporación para la silica gel , operando $T=40^{\circ}\text{C}$ , $v = 5.92\text{ m/s}$ y $H = 1.5\text{ cm}$ . . . . .	128
5.8 Resultados que se utilizaran para el escalamiento del secador al nivel piloto. . . . .	138

<b>5.9</b>	Resultados obtenidos para el escalamiento del secador al nivel de planta piloto . . . . .	144
<b>5.10</b>	Valores de espaciado de bandeja que servirá para el diseño y construcción del secador al nivel planta piloto. . . . .	143
<b>I.1</b>	Clasificación de secadores comerciales basada en la transferencia de calor. . . . .	178
<b>I.2</b>	Clasificación de secadores comerciales basados en el manejo de materiales húmedos. . . . .	179
<b>I.3</b>	Emisividad normal total de diversas superficies. . . . .	185
<b>I.4</b>	Datos obtenidos en el secador de bandejas al nivel de laboratorio para la Silica gel. . . . .	189
<b>I.5</b>	Datos obtenidos en el secador de bandejas al nivel de laboratorio para la Cebolla . . . . .	219

## INDICE DE FIGURAS

Nº TITULO DE FIGURA	PAGS
1.1 Condiciones de Contacto Gas-sólido . . . . .	5
1.2 Métodos de contacto por el tipo de flujo con un lecho fijo de sólidos.	6
1.3 Métodos de Contacto por el tipo de flujo con un lecho móvil, fluidificado y/o diluido de sólidos . . . . .	7
1.4 Secador de compartimento y bandejas. . . . .	19
1.5 Algoritmo para la selección de secadores batch por las características del material a secar y el método de transferencia de calor utilizado . . . . .	20
1.6 Representación de la temperatura de rocío en la carta psicrométrica . . . . .	25
1.7 Diagrama típico de Entalpía – Temperatura para una sustancia pura. . . . .	28
2.1 Contenido de humedad en el equilibrio de algunos sólidos comunes aproximadamente a 25°C. . . . .	37
2.2 Contenido de humedad de equilibrio mostrando histéresis. . . . .	39
2.3 Gráfica mostrando los tipos de humedad utilizados en el secado de sólidos . . . . .	40
2.4 Curva de secado obtenida de datos experimentales en función de la humedad vrs tiempo . . . . .	44
2.5 Curva típica de velocidad de secado para condiciones de secado constante en función del contenido de humedad. . . . .	45
2.6 Transferencia de calor y masa en el secado de un sólido por la superficie exterior. . . . .	53
4.1 Diagrama del secador al nivel de laboratorio . . . . .	80
4.2 Vista lateral del secador mostrando el gabinete lateral móvil. . . . .	81
4.3 Vista Frontal del secador mostrando el ventilador y su control. . . . .	83
4.4 Diagrama del planteamiento de la ecuación de Bernoulli . . . . .	84
4.5 Diagrama eléctrico del secador al nivel de laboratorio . . . . .	90
4.6 Fotografía de la distribución de las resistencias en la cruceta de asbesto.	91

<b>4.7</b>	<b>Fotografía de distribución de los termostatos.</b>	<b>93</b>
<b>4.8</b>	<b>Disposición de las balanzas.</b>	<b>94</b>
<b>5.1</b>	<b>Cámara de Humedad Relativa utilizada en la determinación de humedades de equilibrio.</b>	<b>97</b>
<b>5.2</b>	<b>Contenido de Humedad de equilibrio a diferentes temperaturas para la sílica gel.</b>	<b>101</b>
<b>5.3</b>	<b>Contenido de Humedad de equilibrio a 25°C para la cebolla.</b>	<b>101</b>
<b>5.4</b>	<b>Gráficas obtenidas de las pruebas de laboratorio efectuadas a la Sílica Gel de acuerdo a los 4 niveles de temperatura (T=40, 50, 60 y 70 °C), 4 niveles de espesores (H=1.0, 1.5, 2.0 y 3.0cm) y 2 niveles de velocidad (v1=5.92 m/s, y v2=6.74 m/s)</b>	<b>111</b>
<b>5.5</b>	<b>Gráficas obtenidas de las pruebas de laboratorio efectuadas a la Cebolla de acuerdo a los 3 niveles de temperatura (T=45, 50 y 55 °C), 2 niveles de espesores (H=1.0 y 1.5cm) y 2 niveles de velocidad (v1=5.92 m/s, y v2=6.74 m/s)</b>	<b>115</b>
<b>5.6</b>	<b>Gráfica de humedad vrs tiempo obtenida en laboratorio para el cilantro</b>	<b>117</b>
<b>5.7</b>	<b>Pantalla del menú principal del ambiente del TBLCURVE.</b>	<b>117</b>
<b>5.8</b>	<b>Representación del porcentaje de residuos vrs tiempo (hrs)</b>	<b>122</b>
<b>5.9</b>	<b>Representación de los límites de confianza a 90, 95 y 99 % vrs tiempo (hrs)</b>	<b>122</b>
<b>5.10</b>	<b>Gráficas de velocidad de evaporación contra humedad para la Sílica Gel de acuerdo a los 4 niveles de temperatura (T=40, 50, 60 y 70), 4 niveles de espesores (H=1.0, 1.5, 2.0 y 3.0cm) y 2 niveles de velocidad (v1=5.92 m/s, y v2=6.74 m/s).</b>	<b>130</b>
<b>5.11</b>	<b>Gráficas de velocidad de evaporación contra la humedad para la Cebolla de acuerdo a los 3 niveles de temperatura (T=45, 50 y 55 °C), 2 niveles de espesores (H=1.0 y 1.5cm) y 2 niveles de velocidad (v1=5.92 m/s, y v2=6.74 m/s).</b>	<b>134</b>
<b>5.12</b>	<b>Uniformidad de los materiales sometidos a secado</b>	<b>137</b>

<b>5.13</b>	Representación del paso del aire sobre una bandeja. . . . .	140
<b>6.1</b>	Secador de bandejas al nivel de planta piloto. . . . .	147
<b>6.2</b>	Aspas axiales de aluminio del secador al nivel piloto. . . . .	149
<b>6.3</b>	Sistema de control y generación del flujo de aire. . . . .	150
<b>6.4</b>	Compuerta de celosías de aluminio del secador al nivel piloto. . . . .	151
<b>6.5</b>	Compuerta de movimiento longitudinal . . . . .	151
<b>6.6</b>	Panel de control, conteniendo el regulador de temperatura . . . . .	152
<b>6.7</b>	Panel de resistencias y termocupla del secador al nivel piloto.. . . .	153
<b>6.8</b>	Diagrama eléctrico del secador al nivel piloto. . . . .	154
<b>6.9</b>	Disposición de las bandejas en el secador al nivel de planta piloto, conteniendo sílica gel. . . . .	155
<b>I.1</b>	Carta psicrométrica aire-agua en el sistema internacional. . . . .	182
<b>I.2</b>	Carta psicrométrica aire-agua en el sistema inglés. . . . .	183
<b>I.3</b>	Carta psicrométrica mostrando las líneas de humedad relativa. . . . .	184
<b>I.4</b>	Isométrico general de distribución de elementos para el secador al nivel de laboratorio. . . . .	186
<b>I.5</b>	Vista de planta general del secador al nivel de laboratorio. . . . .	187
<b>I.6</b>	Vista lateral del secador al nivel de laboratorio.. . . .	188
<b>I.7</b>	Vista frontal de distribución de elementos para el secador al nivel piloto	230
<b>I.8</b>	Vista superior del secador al nivel de planta piloto. . . . .	231
<b>I.9</b>	Vista lateral del secador al nivel de planta piloto. . . . .	232

## INTRODUCCION

El estudio de las Operaciones Unitarias en la Ingeniería Química, esta estrechamente relacionada con la dificultad de modificar o alterar la composición de mezclas de sustancias mediante métodos que no impliquen, necesariamente la presencia de reacciones químicas, ya que los procesos de separación se basan en las diferencias que existen en las propiedades físicas.

El término secado, usualmente significa la eliminación de relativamente pequeñas cantidades de agua de un sólido o de un material casi sólido. A diferencia de la evaporación que se limita a la eliminación de cantidades grandes de agua en una solución.

En El Salvador, el secado reviste de mucha aplicación desde el punto de vista de Ingeniería Química, ya que se realiza la *Transferencia de Masa y Calor* simultáneamente; por lo que la mayoría de secadores utilizados en las diferentes agroindustrias, industrias alimenticias, etc., tales como beneficiados de café, granos básicos, cereales, frutas, etc., consumen grandes cantidades de energía para lograr que el producto obtenga una humedad adecuada para su almacenamiento o distribución.

Este consumo de energía se debe a que los secadores son adaptados a estos procesos agroindustriales provenientes de otros tipos de procesos o son empíricos, es decir contruidos prescindiendo del fundamento de la transferencia de masa y calor que involucra en el secado.

Otra importancia que tiene la operación del secado es en la preservación de alimentos, (que en gran parte son deshidratados o empacados al vacío, permitiendo conservar su sabor, olor, color, valor nutritivo, etc.) ya que los microorganismos presentes en los alimentos provocan su descomposición y en ausencia de agua no pueden crecer ni multiplicarse. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua.

El siguiente trabajo de graduación nos expone los conceptos básicos de la teoría de secado, conceptos que serán las herramientas para el diseño y construcción de los secadores de charolas por lotes, al nivel de laboratorio y piloto.

El buen uso de los secadores requiere del estudio minucioso de los manuales, implícitos en el contenido de trabajo; así como de la coordinación de los educadores. Esto nos conlleva a un desarrollo positivo en la enseñanza práctica, mejorando en consecuencia el aprendizaje de los estudiantes.



## **1.0 GENERALIDADES DEL SECADO DE SOLIDOS.**

La definición del término de secado desde el punto de vista de las operaciones unitarias, se refiere a la eliminación de la humedad en una sustancia por evaporación. En este proceso la mayor atención se presta al producto sólido y el secado implica la eliminación del agua a una temperatura menor que su temperatura de ebullición.

Esta cantidad de agua se elimina normalmente por circulación de aire u otros gases, que básicamente es el medio transportador de la humedad evaporada. Una de las características que se da en el secado, es que generalmente involucra el contacto entre un producto sólido húmedo y una corriente gaseosa. Por lo que antes de comenzar los fundamentos de secado que es la base para el diseño del secador de bandejas, es necesario conocer un poco sobre los tipos de contacto que existen entre los sólidos húmedo y los gases.

### **1.1. SISTEMAS DE CONTACTO GAS - SOLIDO**

En el equipo contacto gas – sólido, los sólidos pueden estar en cualquiera de las cuatro condiciones siguientes, los cuales son presentados en la figura 1.1: Estático, Móvil, Fluidificado y/o Diluido.

#### **1.1.1. ESTATICO.**

Este es un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otras y no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas. Los diferentes métodos mediante el cual el gas entra en contacto con un lecho de sólidos fijo, son mostrados en la figura 1.2 (Perry, 1994).

a) *Flujo Paralelo.*

La dirección del flujo de gas es paralela a la superficie de la fase sólida. El contacto se registra primordialmente en la entrecara comprendida entre dos fases, en donde se produce una leve penetración del gas en los vacíos comprendidos entre los sólidos cercanos a la superficie. El lecho de sólidos se encuentra generalmente en una condición estática.

b) *Flujo Perpendicular.*

La dirección de la corriente de gas es normal a la entrecara de las fases. El gas choca contra el lecho de sólidos y, también en este caso, se encuentra casi siempre en una condición estática.

c) *Circulación Directa.*

El gas penetra y fluye directamente pasando por los intersticios de los sólidos, circulando de una manera más o menos libre en torno a las partículas individuales. Esto ocurre cuando los sólidos están en condiciones estáticas, móviles, fluidificadas o diluidas.

### 1.1.2. MÓVIL.

Este es un tipo de lechos de sólidos ligeramente restringido en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras. El flujo de sólidos puede ser descendente por acción de la fuerza de gravedad u horizontal; pero también pueden registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación, generadas dentro del equipo de proceso. En algunos casos, la elevación de sólidos se logra con equipos auxiliares e independientes del secador y estos fluyen en presencia de la fase gaseosa solo en sentido descendente (Perry, 1994).

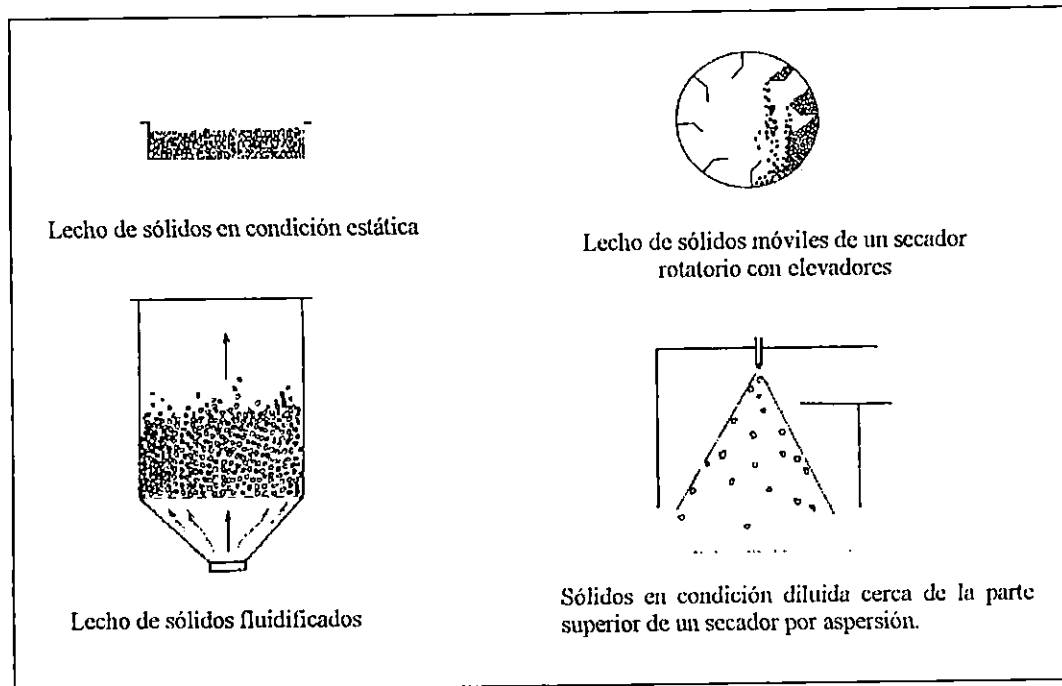


Fig. 1.1 Condiciones de Contacto Gas-sólido. (Perry, 1994)

### 1.1.3. FLUIDIFICADO.

Condiciones en las cuales las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad crítica dada.

Para que el secado sea efectivo, la velocidad superficial ascendente del gas es menor que la velocidad final de asentamiento o sedimentación de las partículas sólidas, la velocidad del gas no es capaz de arrastrar y transportar en forma continua todos los sólidos. Al mismo tiempo, dentro de la corriente del gas se registran turbulencias con velocidades bastantes grandes para elevar transitoriamente las partículas. El movimiento de está es repetidamente ascendente y descendente.

En realidad la fase de los sólidos y la fase gaseosa están entremezcladas y se comportan juntas como un fluido en ebullición (Perry, 1994).

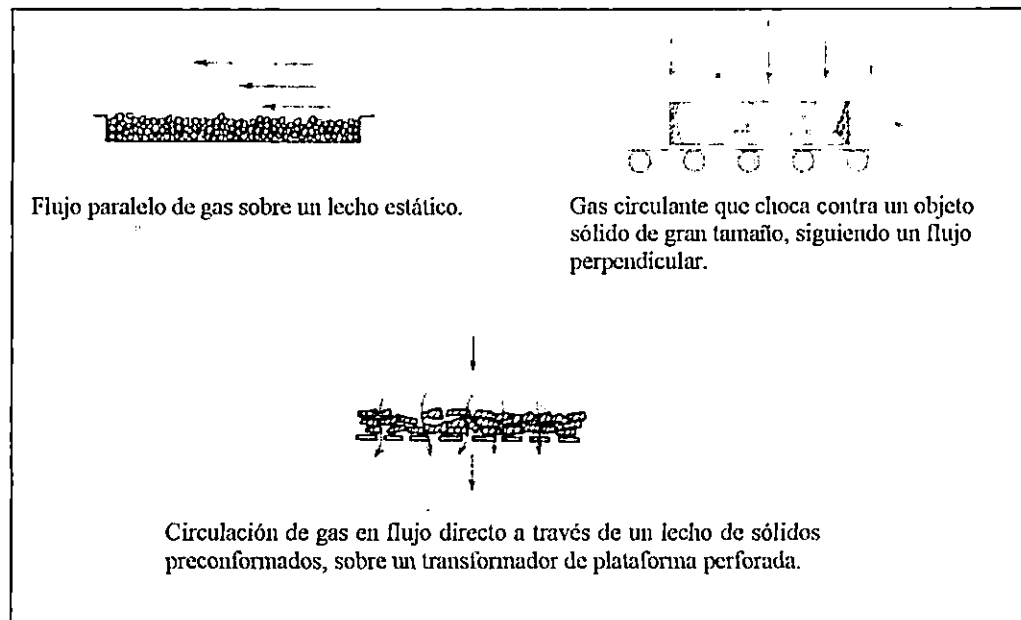


Fig. 1.2 Métodos de contacto por el tipo de flujo con un lecho fijo de sólidos(Perry,1994).

#### 1.1.4. DILUIDO.

Esta es una condición irrestricta en el cual las partículas sólidas están muy separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas con otras. De otra manera, la fase de los sólidos está tan dispersa dentro del gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa.

Esta situación se presenta cuando la velocidad del gas en todos los puntos del sistema sobrepasa la velocidad final de asentamiento de los sólidos, y las partículas ascienden y son arrastradas continuamente por el gas (Perry, 1994).

Por el tipo de flujo de contacto gas – sólido en condiciones móviles, fluidificados y/o diluidos, hay tres términos más que es preciso definir y cada uno de ellos son mostrados en la figura 1.3.

a) *Flujo de gas en corriente paralela.*

La fase gaseosa y las partículas sólidas se desplazan en la misma dirección.

b) *Flujo de gas a contracorriente.*

La dirección de flujo del gas es exactamente opuesta a la que sigue el movimiento de los sólidos.

c) *Flujo transversal del gas.*

La dirección de la corriente del gas se realiza en ángulos rectos en relación con el movimiento de los sólidos, a través del lecho de sólidos.

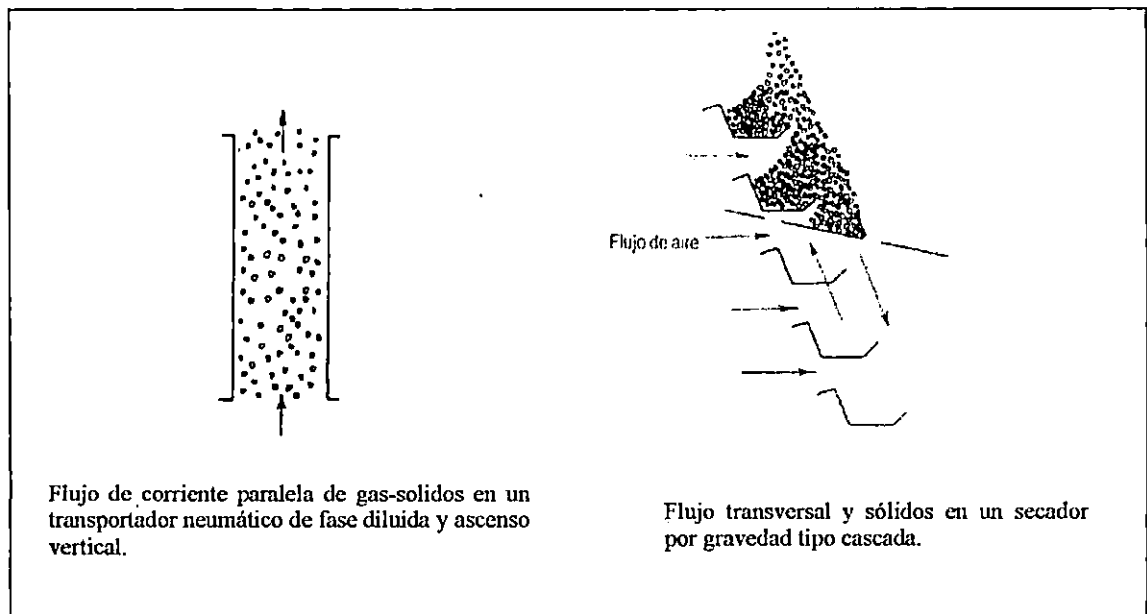


Fig. 1.3 Métodos de Contacto por el tipo de flujo con un lecho móvil, fluidificado y/o diluido de sólidos (Perry, 1994)

Puesto que en una operación de contacto entre gases y sólidos, la transferencia o transmisión de calor y masa se desarrolla en la superficie de estos últimos, se puede esperar una máxima eficiencia de proceso con una máxima exposición de la superficie de los sólidos a la fase gaseosa, junto con un mezclado minucioso de gas y sólido.

Los dos aspectos anteriores son de mucha importancia, ya que en cualquier disposición de sólidos en forma de macropartículas, el gas está presente en los vacíos generados entre partículas y entra en contacto con todas las superficies, excepto en los puntos en que las partículas estén en contacto entre sí.

No obstante, cuando el lecho de sólidos se encuentra en una condición estática o de movimiento laminar, el gas que se introduce en los vacíos queda separado del cuerpo principal de la fase gaseosa. Es posible que se registre cierta transferencia de energía y masa por difusión, pero por lo general es insignificante.

## 1.2. CLASIFICACION DE LOS SECADORES.

Existen varias maneras de clasificar los equipos de secado. Las dos clasificaciones más útiles se basan en:

- a) El método de transmisión de calor a los sólidos húmedos.
- b) Las características de manejo y las propiedades físicas del material mojado.

El primer método de clasificación revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secador, mientras que el segundo es más útil para seleccionar entre un grupo de secadores, que se someten a una consideración preliminar en relación con un problema de secado específico (Perry, 1994).

### 1.2.1. CLASIFICACION BASANDOSE EN EL METODO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Estos pueden dividirse en *Directos*, *Indirectos* y *los utilizados por energía radiante y dieléctricos*; estipulando subdivisiones de operación continua o en lotes.

#### 1.2.1.1. Secadores Directos.

La transmisión de calor se obtiene completamente por contacto directo de las sustancias con el gas caliente, en el cual tiene lugar la evaporación. Las características generales de operación de los secadores directos son (Perry, 1994):

- a) El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.
- b) Las temperaturas de secado varían hasta 1000 K (727°C), que es la temperatura limitante para casi todos los metales estructurales de uso común. A mayores

temperaturas, la radiación se convierte en un mecanismo de transmisión de calor de suma importancia.

- c) A temperaturas de gases inferiores al punto de ebullición, el contenido de vapor de un gas influye en la velocidad de secado y en la humedad final del sólido. En todas las zonas donde la temperatura de gas es superior al punto de ebullición, el contenido de vapor del gas tiene solo un ligero efecto de retraso en la velocidad de secado y la humedad final. Por lo tanto, los vapores sobrecalentados del líquido que se está separando, pueden servir como agentes de secado.
- d) Cuando el secado se da a temperaturas bajas, y las humedades atmosféricas son excesivamente altas, será siempre necesario deshumidificar el aire de desecación.
- e) Un secador directo consume más combustible por libra de agua evaporada, cuanto más bajo sea el contenido de humedad del sólido.
- f) La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada, para una temperatura de salida de gas constante.
- g) Debido a la gran cantidad de gas que se necesita para abastecer todo el calor del secado, el equipo de recuperación del polvo puede ser muy grande y costoso, cuando se trata de secar partículas muy pequeñas.

#### *1.2.1.2. Secadores Indirectos.*

Estos se diferencian de los secadores directos en la transmisión de calor y en la separación del vapor, en dichos secadores el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para llevar la humedad evaporada. Las características generales de operación de los secadores indirectos son:

- a) El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de índole metálica.
- b) Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de solidificación, en el caso de secadores al vacío por congelado, esta puede ser hasta



800 K (527°C), para secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.

- c) Los secadores indirectos son apropiados para secar a presiones reducidas y ambientes inertes, para poder recuperar los solventes y evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.
- d) Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son muy económicos, desde el punto de vista del consumo de energía, ya que suministra calor, de acuerdo con la demanda hecha por el material que se está secando.
- e) La recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados, se maneja de un modo más satisfactorio en los secadores indirectos que en los directos.

#### *1.2.1.3. Secadores que utilizan energía radiante y/o dieléctricos.*

En la actualidad, existe una nueva clasificación basada en *el método de transferencia de calor*, que incluye una diversidad de secadores tales como: secadores infrarrojos de calor y secadores dieléctricos, estas son mostradas en el **Cuadro I.1 del anexo I**.

Los secadores infrarrojos dependen de la transmisión de la energía radiante para evaporar la humedad. La energía radiante se suministra eléctricamente por medio de lámparas infrarrojas, resistencias eléctricas o refractarios incandescentes calentados por gas. Este último método ofrece la ventaja adicional del calentamiento por convección. El calentamiento infrarrojo no se utiliza comúnmente en la industria química para eliminar la humedad y su aplicación principal es el horneado o el secado de capas de pintura y en el calentamiento de capas delgadas de materiales.

Los secadores dieléctricos no han encontrado hasta ahora un campo muy amplio de aplicación. Su característica fundamental de generación de calor dentro de los sólidos revela potencialidades para secar objetos geométricos masivos, como madera, diferentes formas de hule espuma y objetos de cerámica.

Los costos de energía aumentan hasta diez veces el costo de combustible por métodos tradicionales.

### 1.2.2. CLASIFICACION POR LAS CARACTERISTICAS DE MANEJO Y PROPIEDADES FISICAS DEL MATERIAL MOJADO.

En el transcurso de los años ha surgido una gran variedad de tipos de equipo para efectuar el secado. Con frecuencia se encuentran dispositivos de construcción completamente diferentes que se utilizan en operaciones similares, únicamente debido a que en una industria se ha hecho costumbre utilizar un cierto tipo de maquinaria y en otra industria se emplea otro tipo diferente para el mismo objeto.

Esta variedad de construcciones hace que sea difícil la clasificación (Badger, 1970). La clasificación esta basada en la forma en que se maneja el material durante el proceso de secado y esta es presentada en el **Cuadro I.2 del anexo I**.

### 1.3. EQUIPOS DE SECADO.

#### 1.3.1. POR LOTES.

##### *1.3.1.1 Secadores de Bandejas.*

Un secador de bandejas o compartimientos es un equipo totalmente cerrado y aislado en el cual los sólidos se colocan en grupos de bandejas en el caso de partículas sólidas, o amontonados en pilas o repisas, en el caso de objetos grandes. La transmisión de calor puede ser *directa* del gas a los sólidos, utilizando la circulación de grandes volúmenes de gas caliente, o *indirecta* utilizando repisas o bases calentadas, serpentines de radiador o paredes refractarias en el interior de la cubierta.

En unidades de calor indirecto, exceptuando los equipos de parrillas o repisas al vacío, casi siempre se necesita la circulación de una pequeña cantidad de gas para eliminar el vapor de humedad del compartimiento y evitar la saturación y condensación del gas. Las unidades de compartimientos se emplean para calentar y secar madera, cerámica, materiales en hojas (sostenidas en postes), objetos pintados y metálicos, y todas las formas de sólidos particulados (Badger, 1970).

El funcionamiento satisfactorio de los secadores de bandejas depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo el material que se está secando.

Conviene tener una circulación de aire con velocidades de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transmisión de calor en la superficie y con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado.

La corriente de aire adecuada para este género de secadores depende de que el ventilador tenga una capacidad eficiente, del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados. La corriente de aire no

uniforme es uno de los problemas más graves que se presentan en el funcionamiento de los secadores de bandejas.

Los secadores de bandejas pueden ser del tipo de carretillas de bandejas o de bandejas estacionarias. En el primer caso, las bandejas se cargan sobre carretillas que se empujan hasta el interior del secador y en el segundo, las bandejas se cargan directamente en bastidores fijos dentro del secador. Las carretillas están provistas de ruedas con pestañas que corren sobre carriles, o bien, de ruedas planas giratorias. También se pueden suspender de monorraíles sobre las cuales se desplazan. Las carretillas cuentan por lo común con dos hileras de bandejas, cada una de las cuales tienen de 18 a 48 bandejas, según sean las dimensiones de éstas.

Las bandejas pueden ser cuadradas o rectangulares, con una superficie de 0.5 a 1 m<sup>2</sup>/bandeja y se fabrican de cualquier material que sea compatible con las condiciones de corrosión y temperaturas prevalecientes. Cuando se amontonan en una carretilla, debe dejarse un espacio libre de no menos de 4 cm entre el material que contienen y la base de la que está inmediatamente encima.

Cuando las características del material y el manejo lo permitan, las bandejas deben de tener fondos perforados para proporcionar una mayor superficie de secado. En general, se prefiere las bandejas metálicas, ya que conducen el calor con mayor facilidad. Las cargas de la bandeja varían comúnmente de 1 a 10 cm de profundidad.

El medio de calentamiento usual es el vapor, y la configuración estándar del calentador consta de un calentador principal anterior al ventilador de circulación. Cuando no se dispone de vapor o la carga de secado es pequeña, se puede utilizar calor generado eléctricamente. Para temperaturas superiores a 450 K, es factible utilizar productos de combustión o calentadores de aire encendido indirecto.

El aire se hace circular por medio de ventiladores de hélice o centrífugas; por lo común, el ventilador se monta dentro o directamente arriba del secador. A temperaturas superiores a

450 K, es necesario emplear cojinetes externos o enfriados con agua. La caída total de presión por las bandejas, los calentadores y los ductos es, casi siempre, del orden de 2 a 5 cm de agua. La recirculación del aire es del orden del 80 al 95%, excepto durante la etapa inicial de secado de evaporación rápida. El ventilador de circulación atrae aire fresco que entra casi siempre a través de los filtros de polvos. En la mayor parte de las instalaciones, el aire se expulsa mediante un pequeño ventilador de expulsión independiente que cuenta con un amortiguador para controlar las velocidades de recirculación del aire.

#### Datos Generales de Operación:

Normalmente se utilizan desviadores ajustables o una placa perforada de distribución para desarrollar una caída de presión de 0.3 a 1.3 cm de agua en una pared por el cual el aire penetra en la cubierta en donde se colocan las carretillas. Esto aumenta la uniformidad de la distribución del aire, de la parte superior a la base, entre las bandejas. En tres o más hornos de carretillas, es factible colocar serpentines de calentamiento del aire entre éstas, si la carga evaporativa es grande. También se pueden proporcionar medios para invertir la dirección de flujo del aire en unidades de muchas carretillas.

De algunos datos de operación de varios secadores típicos, revelan que se puede esperar un índice general de evaporación de 0.0025 a 0.025 Kg agua/(s.m<sup>2</sup>) de área de bandeja en los secadores de bandejas y carretillas de bandejas. La eficiencia térmica de este secador oscila entre el 20 y 50%, según la temperatura de desecación utilizada y la humedad del aire de expulsión. Cuando se desecan contenidos de humedad muy bajos con restricciones de temperatura, la eficiencia térmica llega a ser del orden del 10%. El principal costo de operación del secador de bandejas es la mano de obra que se requiere para efectuar la carga y descarga. En general se necesita aproximadamente de 1/3 a 1/5 del tiempo de un hombre para supervisar el secador durante el periodo de desecado. La potencia necesaria para los secadores de bandejas y compartimientos es del orden de 1.1 KW/carretilla,

aproximadamente, y el mantenimiento representa entre el 3 y el 5% del costo instalado, por año.

### *1.3.1.2 Secadores de bandejas con circulación directa.*

Este es una modificación al secador de bandejas, ya que el aire caliente se recircula sobre los platos logrando una mayor eficiencia en la evaporación del líquido. Cuando la consistencia del producto es tal que pueda manejarse en bandejas, se puede utilizar el secador por circulación directa. Las materias que pueden ser secadas son sustancias mojadas y plásticas, masas granulares como los son los materiales cristalinos, pastas y precipitados; maderas y otros productos textiles, así como algunos productos similares que no han de manejarse en bandejas.

El manejo de los materiales en las bandejas es fácil, tanto en la carga como en la descarga, no obteniéndose pérdidas, ayudándonos a manejar por este método materiales valiosos o pequeñas cantidades de cualquier otro (Perry, 1994).

#### b.1 Partes del equipo:

Este secador esta constituido por una cámara rectangular (ver figura 1.4), recubierta sus paredes por un aislante que reduce la transmisión de calor al exterior. En el interior de la cámara hay estantes, fabricadas de ángulo ligero, sobre las cuales se deslizan las bandejas. Para la circulación del aire sobre las bandejas se utiliza un ventilador, el aire se calienta por medio de un serpentín que esta colocado en el interior de la cámara. En las esquinas de la cámara se colocan deflectores (E) que aseguran que el flujo de aire caliente sea hacia abajo en el espacio vertical del lado izquierdo de la cámara. El aire que ha pasado sobre las bandejas, mezclado con cierta cantidad de aire fresco, pasa por un serpentín (F) antes de que llegue al ventilador. Unas válvulas de mariposa colocadas adecuadamente (no presentadas en la **figura 1.4**), están normalmente controladas automáticamente, varían el

porcentaje de aire fresco que se introduce y el aire cargado de humedad que sale del secador.

Para proporcionar aire fresco con una buena distribución a lo largo del secador se utilizan velocidades altas, tales como 100 m/min, dando como consecuencia un tiempo de contacto corto del aire caliente con las bandejas, contribuyendo a que la cantidad de agua que toma el aire en un solo paso a lo largo del secador sea mínima, de forma que en la mayor parte de los casos el 80 al 90 % del aire descargado por el ventilador (D) se recircula, haciéndolo volver sobre las bandejas y únicamente del 10 al 20 % se toma del aire fresco, introduciéndolo por (B).

Al principio del ciclo, cuando la carga esta completamente mojada, puede tomarse algo más de aire fresco que al final del ciclo, cuando la carga está casi seca. El accionamiento de las válvulas de mariposa se efectúa normalmente por instrumentos de control automático (Badger, 1970).

#### b.2 Equipos Auxiliares:

Si durante la operación se desprenden gases, humos o polvos dañinos, será necesario instalar en el sistema de expulsión de gases un equipo de recuperación de polvos o humos. En ocasiones se utilizan lavadores húmedos para recuperar solventes valiosos de los secadores. Con el fin de reducir al mínimo las pérdidas de calor, a veces es necesario un aislamiento completo del compartimiento con ladrillos, asbesto u otros compuestos aislantes.

Los separadores prefabricados para secadores de compartimientos de tipo moderno tienen por lo común de 7.5 a 15 cm de recubrimientos aislantes, colocados entre las paredes internas y externas de placas metálicas.

Las puertas y cualquier otra abertura de acceso deben tener empaques y cerrarse herméticamente. En el caso de equipos de bandejas y carretillas, casi siempre se busca contar con bandejas y carretillas adicionales para que puedan cargar previamente, a fin de vaciar y cargar con rapidez el compartimiento entre uno y otro ciclo. En ocasiones se emplean filtros de aire, cuando se trata de unidades de calor directo.

Es esencial tener una profundidad uniforme de carga en los secadores y los hornos, en los cuales se tratan sólidos particulados para lograr un funcionamiento adecuado, ciclos mínimos de calentamiento o el control de la humedad final. Después de cargar la bandeja, el lecho debe nivelar para asegurar una profundidad uniforme. Ocasionalmente se emplean dispositivos de preconformación especiales, como extrusoras de filamentos, granuladoras, etc. , para preparar pastas y tortas de filtro, a fin de utilizar bandejas de base perforada y aprovechar las ventajas de la circulación directa.

El control de equipos de bandejas y compartimientos se mantienen por lo común regulando la temperatura del aire circulante (así como la humedad) y rara vez a través de la temperatura de sólidos.

En secadores directos, con frecuencia se emplean controladores de ciclos para cambiar la temperatura o la velocidad del aire a través de los sólidos durante el ciclo. Por ejemplo: se emplean altas temperaturas de aire durante el período de secado con velocidad constante, en tanto que las superficies de los sólidos se mantienen cerca de la temperatura de bulbo húmedo del aire. Durante los períodos de velocidad decreciente, esta temperatura se reduce para evitar el endurecimiento superficial u otros efectos de degradación provocados por el sobrecalentamiento de las superficies de los sólidos. Además, durante las etapas iniciales del secado es factible emplear velocidades de aire mas elevadas para mejorar la transmisión de calor; sin embargo, una vez que ha concluido el secado de la superficie, dicha velocidad se debe reducir, con el fin de evitar la formación de polvo. (Para esto se acostumbra utilizar ventiladores de circulación de 2 velocidades).



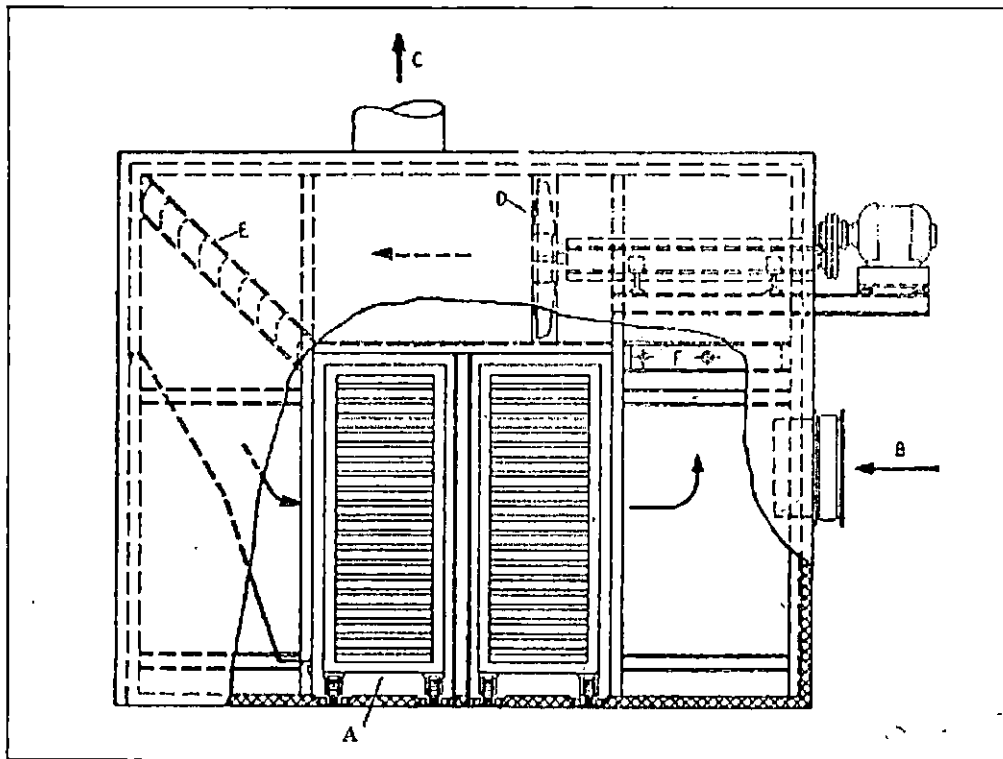


Fig. 1.4 Secador de compartimiento y bandejas: A, vagonetas que transportan las bandejas; B, entrada de aire; C, salida de aire; D, ventilador; E, pantallas deflectoras del aire; F, calentador de tubos de alitas. (Banchero, 1970)

A continuación se presenta en la **figura 1.5** un algoritmo para la selección de secadores Batch, de acuerdo a la clasificación de secadores por el método de transferencia de calor y las características de manejo y las propiedades físicas del material mojado:

# Algoritmo para Selección de Secadores Batch

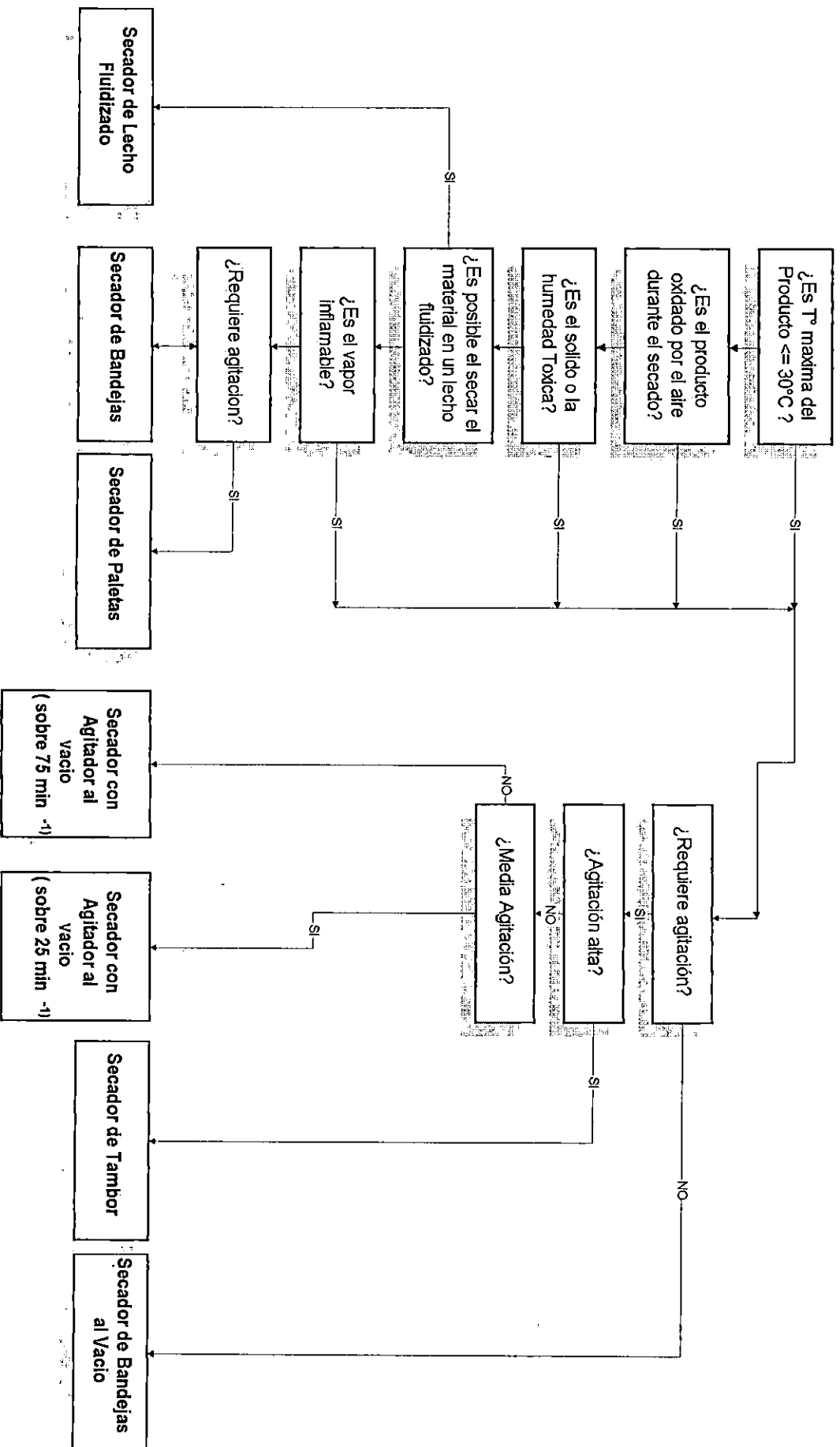


Fig 1.5. Algoritmo para la selección de secadores batch por las características del material a secar y el método de transferencia de calor utilizado.

#### 1.4. APLICACIÓN DE LA PSICROMETRÍA A LAS OPERACIONES DE SECADO.

En cualquier proceso de secado, suponiendo un suministro adecuado de calor, *la temperatura y velocidad* a las cuales se produce la vaporización del líquido depende de la concentración de vapor en la atmósfera circundante.

En el secado al vacío u otros procesos que impliquen ambientes con 100% de vapor, *la temperatura de vaporización del líquido* será mayor o igual que la temperatura de saturación del mismo, a la presión del sistema. (cuando esté presente líquido libre o una superficie mojada, el secado ocurre a la temperatura, al igual que el agua libre a 101.325 KPa de presión absoluta se vaporiza en una atmósfera de vapor al 100% de vapor, a 100 °C).

Cuando el vapor desprendido se extrae del medio secante utilizando un segundo gas (inerte), la temperatura a la que se produce la vaporización dependerá de la *concentración del vapor en el gas que lo rodea*. Consecuentemente, el líquido se debe calentar a una temperatura a la que su presión de vapor sea igual o exceda a la presión parcial de vapor en el gas de purga. En la situación opuesta se producirá una condensación.

En casi todas las operaciones de secado, el agua es el líquido evaporado, y el aire es el gas de purga que se emplea comúnmente. Para fines de desecación, se dan algunos términos psicrométricos importantes que ayudaran a comprender las variables involucradas en el secado.

A continuación, el término vapor se va aplicar al agua, (designada como sustancia A), que en el estado de vapor esté relativamente cerca de su temperatura de condensación a la presión dominante. El término gas se aplicará al aire y será designada como la sustancia B.

### 1.4.1. HUMEDAD ABSOLUTA.

Aun cuando las unidades comunes de concentración tales como la presión parcial, fracción molar, etc., que están basadas en la cantidad total son útiles, cuando en las operaciones ocurren cambios en el contenido de vapor de una mezcla vapor-aire sin cambios en el contenido del aire, es más conveniente utilizar una unidad basada en la cantidad no cambiante del aire. La relación Masa de vapor de agua/Masa de aire es la *HUMEDAD ABSOLUTA (Y')*. Si las cantidades se expresan en moles, la relación es la *HUMEDAD MOLAL ABSOLUTA (Y)*. En condiciones en que se aplican la ley de los gases ideales:

$$Y = \frac{y_A}{y_B} = \frac{P_A}{P_B} = \frac{P_A}{P_T - P_A} \quad \frac{\text{moles de agua}}{\text{moles de aire}} \quad (1.1)$$

$$Y' = Y \frac{M_A}{M_B} = \frac{P_A}{P_T - P_A} \times \frac{M_A}{M_B} \quad \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de aire}} \quad (1.2)$$

Donde  $M_A$  y  $M_B$  son los pesos moleculares del agua y aire, los cuales son 18.02 y 28.97 kg/kgmol;  $P_A$  y  $P_B$  son las presiones parciales del agua y aire respectivamente, y si la presión del sistema la consideramos constante de  $1.0133 \times 10^5$  Pa, al sustituir en la ecuación (1.2) se tiene:

$$Y' = \frac{0.622 P_A}{1.0133 \times 10^5 - P_A} \quad \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire}} \quad (1.3)$$

### 1.4.2. HUMEDAD DE SATURACIÓN.

Si el aire seco insoluble se pone en contacto con suficiente agua líquida, este se evaporará en el aire hasta que finalmente, en el equilibrio, la presión parcial del agua en la mezcla alcanza su valor de saturación, la presión de vapor  $P_A$  a la temperatura predominante.

Entonces se puede definir la *HUMEDAD DE SATURACION* como el contenido de vapor en el que está en equilibrio a la temperatura del sistema. Como el aire se considera insoluble en el agua, la presión parcial del agua en la mezcla saturada será independiente de

la naturaleza del aire y la presión total (excepto a presiones altas) y solo depende de la temperatura e identidad del líquido. Entonces definimos la *Humedad molal de saturación* ( $Y_s$ ) y *Humedad absoluta de saturación* ( $Y_s'$ ) como:

$$Y_s = \frac{P_A^o}{P_T - P_A^o} \quad \frac{\text{moles de agua}}{\text{moles de aire}} \quad (1.4)$$

$$Y_s' = \frac{P_A^o}{P_T - P_A^o} \frac{M_A}{M_B} \quad \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de aire}} \quad (1.5)$$

Donde  $P_A^o$  es la presión de vapor del agua a la temperatura prevaleciente. Las dos humedades saturadas se vuelven infinitas en el punto de ebullición del líquido a la presión total dominante.

#### 1.4.3. TEMPERATURA DE BULBO SECO. ( $T_G$ )

Es la Temperatura de una mezcla "vapor- gas" determinada en una forma ordinaria por inmersión de un termómetro en la mezcla.

#### 1.4.4. HUMEDAD RELATIVA.

La Humedad Relativa (% HR), llamada también Saturación Relativa, expresada como un porcentaje, nos define la razón de la presión parcial del vapor a la presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema.

$$\% \text{ HR} = \frac{P_A}{P_A^o} \times 100 \quad (1.6)$$

#### 1.4.5. PORCENTAJE DE HUMEDAD ABSOLUTA.

El porcentaje de Humedad Absoluta (% HA), llamada también porcentaje de saturación, y se define como la razón de la humedad absoluta y la humedad de saturación.

$$\% \text{ HA} = \frac{Y'}{Y_s'} \times 100 = \frac{Y}{Y_s} \times 100 \quad (1.7)$$

Todas las curvas de % de humedad constante alcanzan el infinito en el punto de ebullición del agua a la presión dominante

#### 1.4.6. TEMPERATURA DE ROCÍO.

Es la temperatura a la cual una mezcla vapor-gas (agua – aire) se satura cuando se enfría a presión total constante sin contacto con el líquido. Por ejemplo, si una mezcla no saturada, como la que se encuentra en el punto F (ver fig. 1.6), se enfría a presión constante sin contacto con el líquido, la trayectoria del proceso de enfriamiento sigue la línea FG, la mezcla se va acercando más a la saturación conforme disminuye la temperatura y se satura completamente en  $t_{DP}$ , o temperatura de rocío. Todas las mezclas de humedad absoluta  $Y_1'$  sobre esta figura tienen el mismo punto de formación de rocío. Si la temperatura se reduce solo una cantidad infinitesimal debajo de  $t_{DP}$ , el vapor se condensara en la forma de un rocío líquido.

Eso se utiliza como un método de determinación de humedad: una superficie metálica brillante se enfría en la presencia de la mezcla de gas, y la aparición de una niebla que empaña la superficie del metal indica que se ha alcanzado el punto de formación de rocío. Si la mezcla se enfría a una temperatura inferior, continuará precipitando líquido de la mezcla vapor – gas, y permanecerá siempre saturada, hasta que la mezcla residual vapor – gas, a la temperatura final  $t_2$ , esté en el punto H. La masa de vapor condensada por unidad de masa de gas seco será  $Y_1' - Y_2'$ . La sobresaturación no ocurrirá sino en condiciones

especialmente controladas; además, no se obtendrá una mezcla vapor - gas cuyas coordenadas caigan a la izquierda de la curva GD.

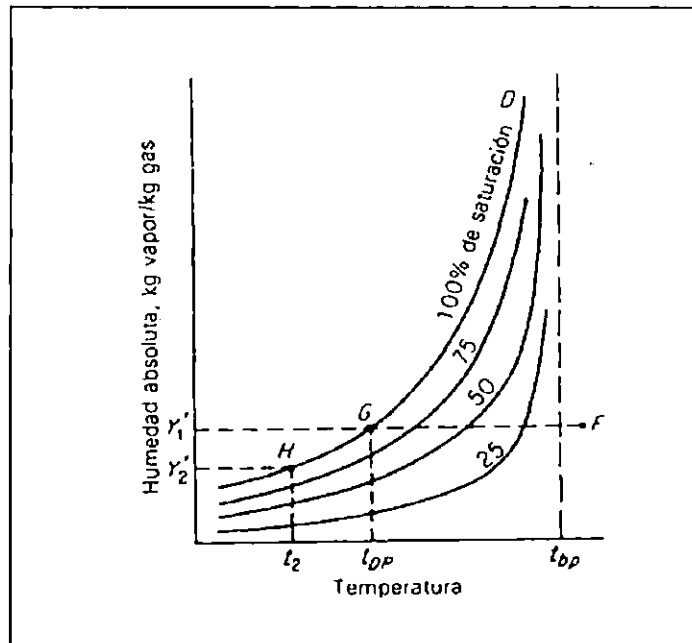


Fig. 1.6. Representación de la temperatura de rocío en la carta psicrométrica. (Treybal, 1988).

#### 1.4.7. VOLUMEN HÚMEDO ( $V_H$ ).

Es el volumen de masa unitaria de gas seco (aire) y de su vapor (agua) acompañante a la temperatura y presión dada. Para una mezcla de humedad absoluta  $Y'$  en  $T_G$  y  $P_t$  presión total, la ley de los gases ideales da el volumen húmedo como:

$$V_H = \left( \frac{1}{M_B} + \frac{Y'}{M_A} \right) \times 22.41 \times \frac{T_G + 273}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{P_t} \quad (1.8)$$

Donde  $V_H = \text{m}^3/\text{kg}$ . aire seco;  $T_G = ^\circ \text{C}$ ;  $P_t = \text{N/m}^2$ . Simplificando la ecuación (1.8) nos queda en el sistema SI:

$$V_H = 8315 \times \left( \frac{1}{M_B} + \frac{Y'}{M_A} \right) \times \frac{T_G + 273}{Pt} \quad (1.9)$$

en el sistema ingles:

$$V_H = 0.730 \times \left( \frac{1}{M_B} + \frac{Y'}{M_A} \right) \times \frac{T_G + 460}{Pt} \quad (1.10)$$

donde:  $V_H = \text{pie}^3/\text{lbm}$  aire seco;  $T_G = ^\circ\text{F}$ ; y  $Pt = \text{atm}$ .

Si sustituimos para el sistema aire – agua, sus pesos moleculares respectivos tendremos:

$$V_H = (0.00283 + 0.00456 Y') (T_G + 273) \quad \text{m}^3/\text{kg. aire seco} \quad (1.11)$$

$$V_H = (0.0252 + 0.0405 Y') (T_G + 460) \quad \text{pie}^3/\text{lbm. aire seco} \quad (1.12)$$

El volumen húmedo de una mezcla saturada se calcula con  $Y' = Y'_s$ , y para un gas seco con  $Y' = 0$ .

#### 1.4.8. CALOR HÚMEDO (CS).

El calor húmedo es el calor que se requiere para aumentar la temperatura de la masa unitaria de gas y su vapor acompañante en  $1^\circ\text{C}$  a presión constante. Para una mezcla de humedad absoluta  $Y'$ :

$$C_s = C_B + Y' C_A \quad (1.13)$$

Donde  $C_B$ ,  $C_A$ : Capacidad calorífica del gas (aire) y vapor (agua) respectivamente.

Si no existe evaporación, ni condensación, el calor en BTU necesario para que la temperatura de una masa  $W_B$  de gas seco y su vapor acompañante aumente una cantidad  $\Delta t$ , será:



$$Q = W_B C_s \Delta t \quad (1.14)$$

#### 1.4.9. ENTALPÍA (H').

La Entalpía relativa de una mezcla “vapor – gas” (agua – aire) es la suma de las entalpías relativas del contenido en gas y en vapor. Si masa unitaria de un gas que contiene una masa  $Y'$  de vapor a la temperatura de bulbo seco  $T_G$ . Si la mezcla no está saturada, el vapor está en un estado de sobrecalentamiento, y se puede calcular la entalpía con relación a los estados de referencia, gas y líquido saturado a  $t_o$ . La entalpía del gas (aire) es  $C_B (T_G - t_o)$ . El vapor en  $T_G$  está en una condición correspondiente al punto A (ver figura 1.7); su estado de referencia corresponde al punto D. Si  $t_{DP}$  es el punto de formación de rocío de la mezcla ( $t_2$  en la figura 1.7) y  $\lambda_{DP}$  el calor latente de evaporación del vapor a esta temperatura, la entalpía por masa unitaria de vapor (agua) será  $C_A (T_G - t_{DP}) + \lambda_{DP} + C_{A,L}(t_{DP} - t_o)$ . La entalpía total para la mezcla, por masa unitaria de gas seco se expresa como:

$$H' = C_B (T_G - t_o) + Y' [C_A (T_G - t_{DP}) + \lambda_{DP} + C_{A,L} (t_{DP} - t_o)] \quad (1.15)$$

Para las bajas presiones que generalmente se encuentran al trabajar en humidificación, procesos de secado para materiales inorgánico, etc.; el punto A que realmente cae sobre una línea de presión constante, correspondiente a la presión parcial del vapor en la mezcla, puede, para todos los fines prácticos, considerarse como si estuviese sobre una línea cuya presión fuera  $A'$ , es decir la presión de saturación del vapor a la temperatura de referencia. Entonces, la entalpía del vapor (agua) puede calcularse siguiendo la trayectoria  $A'ED$  y se vuelve, por masa unitaria de vapor,  $C_A (T_G - t_o) + \lambda_o$ , en donde  $\lambda_o$  es el calor latente de vaporización a la temperatura de referencia. Por tanto, la entalpía de la mezcla, por masa unitaria de gas seco será:

$$\begin{aligned}
 H' &= C_B (T_G - t_o) + Y' [C_A (T_G - t_o) + \lambda_o] \\
 &= C_S (T_G - t_o) + Y' \lambda_o
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

Donde,  $t_o$ : Temperatura de referencia.

$C_{A,L}$  : Capacidad calorífica del líquido condensado.

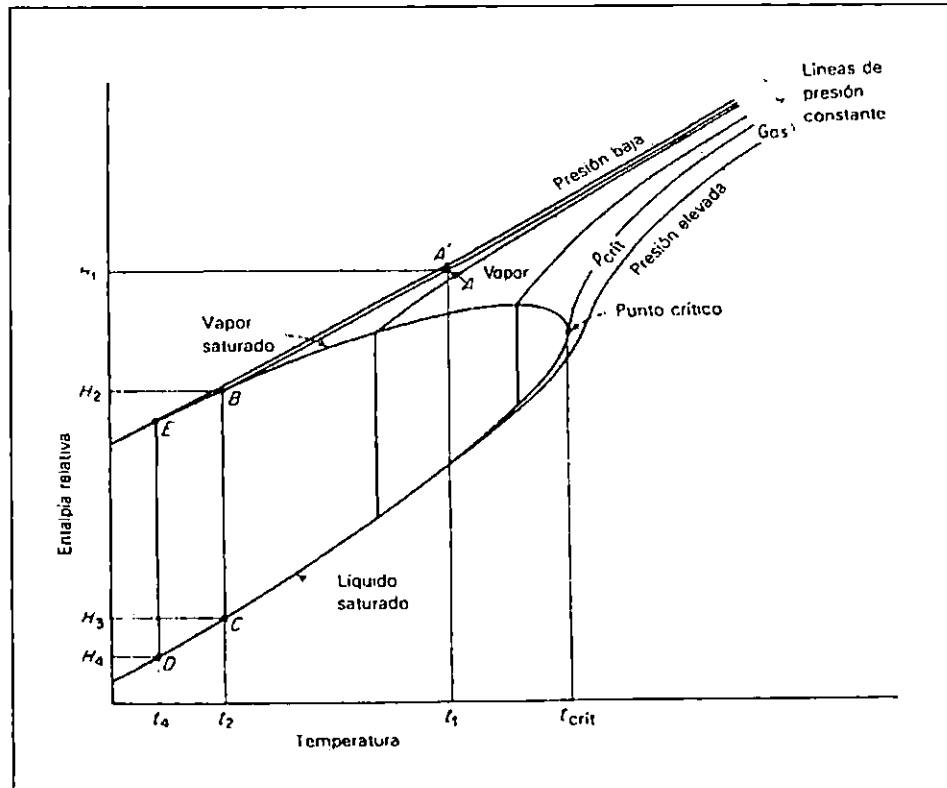


Fig. 1.7. Diagrama típico de Entalpía - Temperatura para una sustancia pura. (Treybal, 1988)

Sustituyendo  $Y_s'$  y el  $C_s$  en la ecuación (1.16), las entalpías de las mezclas saturadas,  $H_s'$ , puede calcularse y graficarse contra la temperatura sobre una carta psicrométrica. En la misma forma se puede graficar  $H'$  para el gas seco (aire).

Si tomamos la temperatura de referencia en  $0^\circ\text{C}$  ( $32^\circ\text{F}$ ) para el agua líquida saturada y aire gaseoso, además se sabe que para el sistema agua –aire,  $C_s = 1005 + 1884Y'$  Joule/kg. de aire seco  $^\circ\text{C}$  ( $0.24 + 0.45 Y'$  en BTU de mezcla/lbm aire  $^\circ\text{F}$ ),  $\lambda_o = 2,502,300$  Joule/kg. agua ( $1075.8$  BTU/lbm), al sustituir en la ecuación (1.16) resulta:

$$H' = (1005 + 1884 Y')T_G + 2502300Y' \quad \text{Joule de mezcla/kg aire seco} \quad (1.17)$$

En el sistema inglés nos queda:

$$H' = (0.24 + 0.45 Y')(T_G - 32) + 1075.8Y' \quad \text{BTU de mezcla/lbm aire seco} \quad (1.18)$$

#### 1.4.10. CURVAS DE SATURACIÓN ADIABÁTICA Y TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo ( $T_w$ ) representan también las líneas de saturación adiabática ( $T_{sA}$ ) para el aire y el vapor de agua, y estas se basan en la relación:

$$T_G - T_{sA} = \frac{\lambda_{sA}}{C_s} (Y'_{sA} - Y') \quad (1.19)$$

$$T_G - T_w = \frac{\lambda_w}{(h_G / k_Y)} (Y'_w - Y') \quad (1.20)$$

donde :

$Y'_{SA}$  y  $Y'_W$  representan las humedades absolutas a la temperatura de saturación adiabática y bulbo húmedo respectivamente.

$\lambda_{SA}$  y  $\lambda_W$ , representan los calores latentes de vaporización a  $T_{SA}$  y  $T_W$  respectivamente.

$h_G / k_Y$  es la relación psicrométrica o relación de Lewis para el aire – agua. En el sistema internacional  $h_G / k_Y = 950 \text{ Joule/kg. K}$  (en el inglés  $h_G / k_Y = 0.227 \text{ BTU/lbm } ^\circ\text{F}$ ).

La pendiente de la ecuación (1.19) es  $C_S / \lambda_{SA}$  y estas líneas denotan la relación entre la temperatura y la humedad del aire que pasa por un secador continuo o por lotes que funciona en forma adiabática (Treybal, 1988).

Las temperaturas de bulbo húmedo se establece gracias al equilibrio dinámico entre la transmisión de calor y la transferencia de masa, cuando el líquido se evapora de una masa pequeña, por ejemplo, el bulbo húmedo de un termómetro, hacia una masa de gas muy grande, de tal suerte que esta última no sufre ningún cambio de temperatura o humedad (Bird, Steward, Lighthfoot, 1985).

Las curvas de saturación adiabática son casi una curva de entalpía constante y puesto  $C_S$  tiene el término  $Y'$ , la curva no es recta sino ligeramente cóncava hacia arriba. Para cualquier mezcla vapor – gas existe una temperatura de saturación adiabática, tal que si se pone en contacto con líquido a la misma temperatura, el gas se humidificará y se enfriará. Si se da un tiempo suficiente de contacto, el gas se saturará en  $Y'_{SA}$  a  $T_{SA}$ ; de lo contrario, permanecerá no saturado en cualquier punto sobre la curva de saturación adiabática para la mezcla inicial.

Para el sistema de aire-agua, el coeficiente  $h_G / k_Y$  es aproximadamente igual a  $C_S$ , o que aproximadamente,  $h_G / k_Y * C_S = 1.0$ . Esta es la llamada relación de Lewis (Treybal, 1988). Todos estos conceptos pueden ser representados por medio de gráficas llamadas Cartas Psicrométricas, y para el sistema aire-agua aparece con tanta frecuencia que se cuenta con

cartas excepcionalmente completas para esta mezcla. En el anexo II se representan tres versiones de dicha carta, debe observarse que todas las cantidades ( $Y'$ ,  $H'$ ,  $V_{II}$ ) están graficadas contra la temperatura. En el caso de las figuras del anexo II, la figura A.2 y A.3, las entalpías, las condiciones de referencia utilizadas fueron aire gaseoso y agua líquida saturada a  $0^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$ ), de tal forma que la carta puede utilizarse conjuntamente con las tablas de vapor. Para la carta de la figura A.4, las condiciones de referencia son  $0^{\circ}\text{F}$ . (Felder, 1991).

## 2.0 FUNDAMENTOS DE SECADO.

En El Salvador, las operaciones de secado revisten de gran importancia, por ejemplo en la industria alimenticia especialmente en el área de conservación de granos y productos alimenticios almacenados, las operaciones de secado ocupan la atención de las personas que tienen a su cargo estas actividades, porque constituyen un medio práctico para facilitar la conservación de la calidad de un lote dado con un mínimo peligro de deterioro. Cuando los granos contienen porcentajes de humedad elevados, se requiere eliminar cierto porcentaje de humedad para dejarles solo la humedad límite conveniente para cada tipo de grano, que garantice su conservación en las mejores condiciones por períodos cortos o largos de tiempo (Ramírez Genel, 1975).

Esto trae como consecuencia la disminución de la actividad microbiana y enzimática de los alimentos, ya que muchos de los productos pasan directamente a la comercialización, después de la etapa de secado y empaçado.

El mecanismo de las operaciones de secado, en términos generales se realiza de dos maneras:

- a) Por medios mecánicos, estos métodos no se consideran como una operación de secado, aunque a menudo se procede a una operación de esta naturaleza, ya que es menos costoso y muchas veces más fácil de utilizar, tal como: la extrusión y la compresión.
- b) Por evaporación, este involucra los conceptos de transferencia de masa y calor.

Se aplica el término *secado* a la transferencia de un líquido desde un sólido húmedo hasta una fase gaseosa no saturada, por ejemplo, un sólido húmedo, como madera, tela o papel, etc., puede secarse evaporando la humedad ya sea por una corriente de gas o en ausencia del mismo para desplazar el vapor. Esta operación se limita exclusivamente a la eliminación de la humedad de sólidos por evaporación utilizando una corriente gaseosa.

## 2.1. OBJETIVO DEL SECADO.

El objeto fundamental del secado es el de disminuir el contenido de agua de sólidos húmedos hasta dejarlos en un límite conveniente para garantizar su conservación en el almacenamiento y comercialización. Por ejemplo, en el secado de granos una humedad inadecuada de almacenamiento incrementa el ataque por plagas, lo cual se asegura definitivamente su mejor conservación cuando se realiza en forma apropiada (Ramírez Genel, 1975).

Otros factores incidentes del deterioro de los granos durante su almacenamiento son: hongos, insectos, roedores y otros factores intrínsecos al grano como lo son los cambios químicos y físicos inherentes al grano durante su almacenamiento. Sin embargo; si se almacena grano húmedo sin que el aire pase a través de él, el grano se calentará, respirará (es decir utilizan el oxígeno del aire, produciendo CO<sub>2</sub>, agua, etc.) más rápido y producirá más calor y humedad; por tanto el grano caliente se deteriorará más rápido (Lindblad, 1981).

## 2.2. TERMINOLOGIA.

Como conveniente referencia se van a resumir a continuación ciertos términos generales utilizados en el ámbito del secado, posteriormente algunos de ellos se explicarán con mayor detalle para profundizar y dar un mejor entendimiento del mecanismo de las operaciones de secado, que sirvió como base fundamental para el diseño y construcción del secador al nivel de laboratorio y planta piloto.

Contenido de humedad (base húmeda): El contenido de humedad de un sólido generalmente se describe en función del porcentaje peso de humedad; a menos que se indique lo contrario, se sobreentiende que esta expresado en base húmeda, es decir, masa de agua / masa de sólido húmedo.

Contenido de humedad (base seca): es la expresión del contenido de humedad de sólidos húmedos en masa de agua / masa de sólido seco y se denotará con X.

Humedad de equilibrio ( $X^*$ ): es la humedad limitante a la cual un material dado se puede secar en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire.

Humedad ligada o retenida ( $X_{LJ}$ ): se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura. El líquido puede quedar ocluido por retención en capilares diminutos, por solución en celdas o paredes fibrosas, por solución homogénea a lo largo del sólido y por adsorción química o física en las superficies del sólido.

Humedad no ligada o no retenida ( $X_{NLJ}$ ): se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura. Es un material higroscópico es la humedad excesiva en relación con el contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad de saturación. Todo el contenido de un material no higroscópico es agua no ligada.



Humedad libre ( $X_L$ ): es el líquido que puede ser separado a una temperatura y humedad dadas. Este valor llega a incluir tanto en la humedad ligada y la no ligada

Material higroscópico: es aquel que puede contener humedad ligada.

Material no higroscópico: es aquel que no contiene alguna humedad ligada.

Gradiente de humedad: se refiere a la distribución de agua dentro de un sólido en un momento determinado del proceso de secado.

Distribución inicial de humedad: se refiere a la distribución de humedad en todo un sólido al iniciarse el proceso de secado.

Cambio de humedad no realizado: es la relación entre la humedad libre presente en cualquier instante dado y la que se encontraba inicialmente presente.

Flujo capilar: es el paso de un líquido por los intersticios y sobre la superficie de un sólido provocado por la atracción molecular líquido – sólido.

Difusión interna: se define como el movimiento del líquido o el vapor a través del sólido, como resultado de una diferencia de concentración.

Punto de saturación de fibra: es el contenido de humedad de materiales celulares, tales como la madera, etc. Al cual las paredes celulares están completamente saturadas, en tanto que las cavidades carecen por completo de líquido. Se puede definir como el contenido de humedad de equilibrio conforme la humedad de la atmósfera circundante se acerca a la saturación.

Periodo de velocidad de secado constante: es el lapso de secado durante el cual la velocidad de eliminación del agua por unidad de superficie secada es constante y uniforme.

Humedad crítica: es el contenido de humedad promedio cuando concluye el periodo de velocidad de secado constante.

Periodo de velocidad decreciente: es el lapso de secado durante el cual la velocidad instantánea de secado disminuye en forma continua.

### 2.2.1. HUMEDAD DE EQUILIBRIO ( $X^*$ ).

Es el límite al que puede llevarse el secado de una sustancia con un medio secante de determinadas temperatura, humedad, etc., y depende de la naturaleza del sólido, de la temperatura del agente secante y de su humedad relativa. Aún tratándose de un sólido, es difícil encontrar una ecuación general que ligue todas estas variables que, por otra parte, deben ser de tipo experimental (Brown, 1975)

La humedad de equilibrio se puede absorber como una película superficial, o bien, condensarse dentro de los capilares finos del sólido a presión reducida, y su concentración variará con la temperatura y la humedad del aire que lo rodea. Sin embargo a temperaturas bajas, por ejemplo de 15 a 50°C el contenido de humedad de equilibrio en función del porcentaje de humedad relativa es en esencia, independiente de la temperatura (CEP, 1984).

En el secado de sólidos, es importante establecer una diferencia entre los materiales higroscópicos y los no higroscópicos. En el caso de materiales no porosos, es decir, no higroscópicos dicho contenido es prácticamente cero a todas las temperaturas y humedades. En el caso de materiales orgánicos, como madera, papel y jabón, los contenidos de humedad de equilibrio varían sobre un rango amplio conforme cambia la temperatura y la humedad.

El contenido de humedad de equilibrio varía notablemente con el tipo de material para cualquier porcentaje de humedad relativa, tal como se muestra en la figura 2.1 para diversos

materiales típicos a temperatura ambiente. Para el caso de alimentos, es decir de materiales biológicos también muestran valores altos del contenido de humedad de equilibrio. Generalmente cuando la humedad relativa del aire es alta (60~80%), el contenido de humedad de equilibrio aumenta con gran rapidez al elevarse la humedad relativa (Geankoplis, 1986).

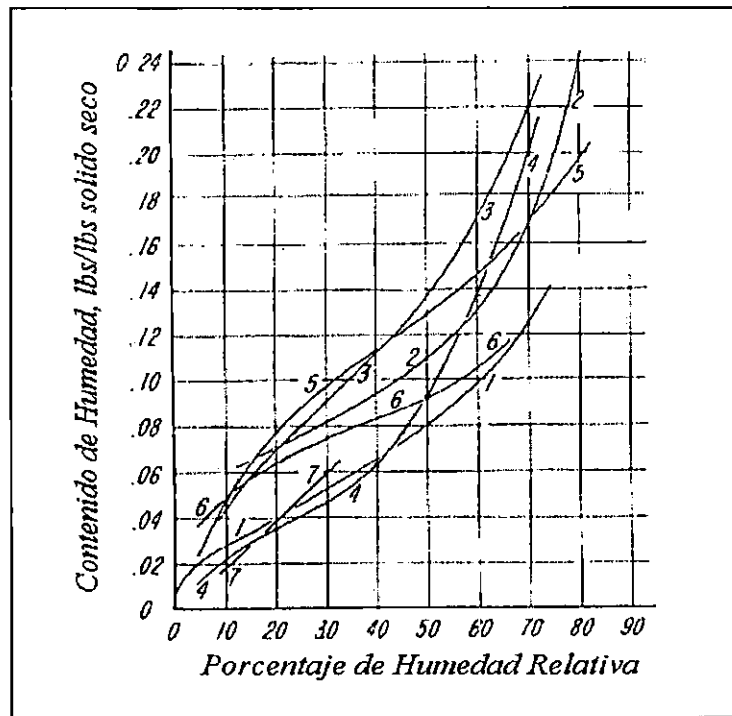


Fig. 2.1. Contenido de humedad en el equilibrio de algunos sólidos comunes aproximadamente a 25°C. 1-Clara de huevo, 10°C. 2-Carne, 10°C. 3-Harina de Pescado, 30°C. 4-Café, 10°C. 5-Almidón, 25°C. 6—Papas, 28°C. 7- Jugo de Naranja. (Van Arsdell, 1973)

Cuando las humedades relativas son bajas, el contenido de humedad de equilibrio es mayor en los materiales alimenticios con altos porcentaje de proteínas, almidones u otros polímeros de alto peso molecular, y más bajo para los materiales alimenticios altos en sólidos solubles. Las sales cristalinas y los azúcares, así como las grasa, generalmente absorben cantidades pequeñas de agua.

En la actualidad, las teorías de la estructuras de sólidos y de los fenómenos superficiales no permiten predecir la variación del contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales en base a principios fundamentales. Por lo tanto no existen relaciones empíricas para la mayoría de los materiales y los contenidos de humedad de equilibrio deben determinarse experimentalmente (Perry, 1998).

Existen 3 formas distintas en que puede estar ligada al producto el agua que constituye su humedad de equilibrio: absorbida por él, retenida en sus poros por fuerzas capilares o combinada químicamente.

Histéresis: Muchos sólidos exhiben diferentes características de humedad en el equilibrio, según que el equilibrio se alcance por condensación (adsorción) o evaporación (desorción) de la humedad. En el secado, lo que interesa particularmente es el equilibrio de desorción; este siempre mostrará el mayor de los dos contenidos de humedad en el equilibrio para una presión parcial dada de vapor, tal como se muestra en la figura 2.2.

La humedad recogida por un sólido seco cuando se expone a aire húmedo, es decir el equilibrio de adsorción, algunas veces se conoce como recuperado (Treybal, 1988).

## 2.2.2. AGUA LIGADA ( $X_{LI}$ ) Y NO LIGADA ( $X_{NLI}$ ) EN LOS SÓLIDOS.

Si el contenido de humedad de equilibrio de un material de la figura 2.1, se prolonga hasta intersectar la línea de humedad relativa de 100%, se obtiene la humedad llamada *agua ligada o combinada* ( $X_{LI}$ ). Esta agua en el sólido desarrolla una *presión inferior* a la del agua líquida a la misma temperatura. Si dicho material contiene más agua que la que indica la intersección con la línea de humedad de 100%, solo se podrá desarrollar una *presión de vapor tan alta* como la del agua común a la misma temperatura. A este exceso de humedad se le llama: *agua no-ligada o sin combinar* ( $X_{NLI}$ ), y dicha agua existe principalmente en los espacios vacíos del sólido. A las sustancias que contienen agua ligada se les conoce como materiales higroscópicos (Geankoplis, 1986).

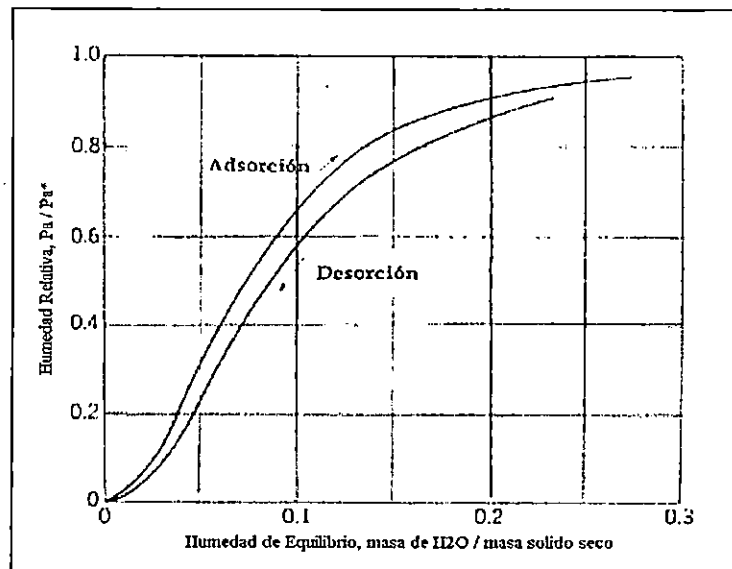


Fig. 2.2. Contenido de humedad de equilibrio mostrando histeresis. (Foust, 1991)

### 2.2.3. HUMEDAD LIBRE. ( $X_L$ ).

Es la humedad contenida en una muestra por encima del contenido en humedad de equilibrio. Puesto que el contenido de humedad de equilibrio es el límite al que puede secarse un material bajo una serie de condiciones determinadas, la humedad que contenga por encima de este punto, es la humedad que puede extraerse por el proceso de secado

En otras palabras la humedad libre se define como la diferencia entre la humedad total del sólido al inicio del secado y la humedad de equilibrio a las condiciones dadas; esto es matemáticamente,  $X_L = X_T - X^*$ . (Badger, 1970).

Todas estas relaciones se muestran en forma gráfica en la figura 2.3, para un sólido con un contenido de humedad ( $X$ ) expuesto a un gas con una humedad relativa  $A$ .

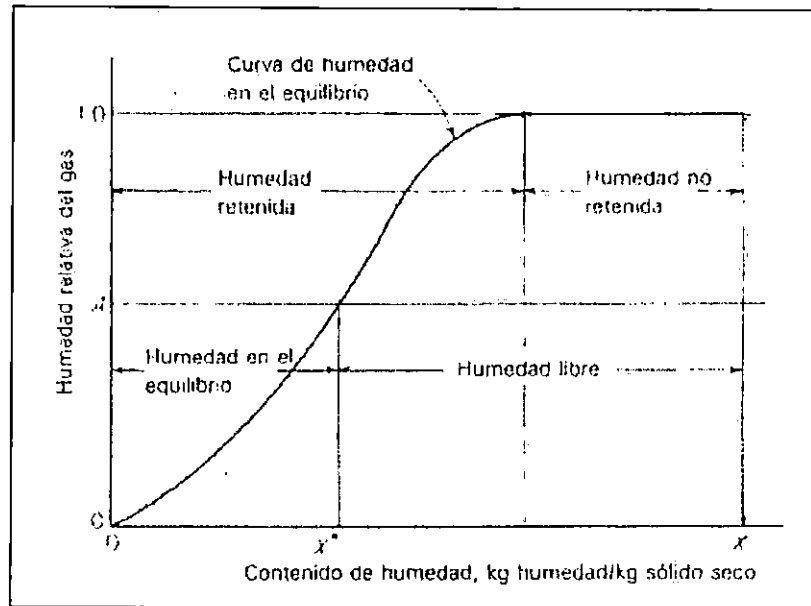


Fig. 2.3. Gráfica mostrando los tipos de humedad utilizados en el secado de sólidos. (Treybal, 1988).

### 2.3. CONDICIONES GENERALES PARA EL SECADO.

El secado de sólidos incluye dos procesos fundamentales y simultáneos:

- a) Se transmite calor para evaporar el líquido.
- b) Se transmite masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor desde la superficie.

Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de secado. En la mayoría de secadores industriales, los métodos de transferencia de calor utilizados difieren fundamentalmente entre sí, ya que la transferencia de calor puede ser por convección, conducción, radiación o una combinación de estos. Sin embargo, en cada caso, el calor debe fluir hacia la superficie externa y luego hacia el interior del sólido. La única excepción es el secado dieléctrico y de microondas, en donde la electricidad de alta frecuencia genera calor internamente creando una temperatura elevada dentro del material y la superficie, tal como se describe en la sección 1.2.1 y resumida en el cuadro I.1 del anexo I.

La masa se transfiere durante el secado en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor que se desprende de las superficies expuestas

Un estudio de la forma como se seca un sólido se puede basar en el *mecanismo interno de flujo de líquido* o en el *efecto de las condiciones externas* (temperatura, humedad, flujo de aire, estado de subdivisión, espesor de la bandeja, etc.) en la velocidad de secado del sólido. Generalmente este último es el más utilizado debido a que los resultados tienen una mayor aplicabilidad inmediata en el diseño y la evaluación de equipos.

### 2.3.1. VELOCIDAD DE SECADO POR LOTES.

Con el fin de fijar horarios de secado y determinar el tamaño del equipo, es necesario saber el tiempo que se requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas. También se desea calcular el efecto que tendrán las diferentes condiciones de secado en el tiempo del secado.

El conocimiento del mecanismo del secado es tan incompleto que, salvo pocas excepciones, es necesario con este fin confiar al menos en algunas mediciones experimentales. Las mediciones de la rapidez del secado por lotes son relativamente fáciles y proporcionan mucha información no solo para la operación por lotes sino también para la operación continua (Treybal, 1988).

### 2.3.2. PRUEBAS DE SECADO.

Para determinar experimentalmente la velocidad de evaporación de un material, se procede colocando una muestra en una bandeja. Si se trata de un material sólido, debe llenar por completo la bandeja de tal manera que quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie de dicho sólido. La pérdida de peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación, colgando la bandeja en una balanza adaptada a un gabinete o a un ducto a través del cual fluye el aire de secado.

Al realizar experimentos de secado por lotes, deben observarse ciertas precauciones para obtener datos útiles en condiciones que se asemejen lo más posible a las que imperarán en las operaciones a gran escala. La muestra no debe ser demasiado pequeña y debe introducirse en una bandeja similar a la que se usará en producción. La relación de superficie de secado a superficie de no secado (superficie aislada) así como la profundidad del lecho del sólido deben ser idénticas. La velocidad, la humedad, la temperatura y la dirección del aire deben ser los mismos y constante para simular un secado en condiciones invariables. (Geankoplis, 1986).



### 2.3.3. PERIODOS DE SECADO.

Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes generalmente se expresan como peso total  $W$  del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos  $\theta$  horas en el periodo de secado. Estos valores pueden convertirse a datos de velocidad de secado con los siguientes procedimientos.

- a) Se recalculan los datos, la pérdida de peso se debe expresar en términos de razones masa. Si  $W$  es el peso del sólido húmedo y  $W_s$  es el peso del sólido seco entonces:

$$X_T = \frac{W - W_s}{W_s} \quad \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de sólido seco}} \quad (2.1)$$

- b) Usando los datos calculados con la ecuación (2.1) se traza una gráfica del contenido de humedad en función del tiempo  $\theta$  horas, tal como se presenta en la figura 2.4.
- c) Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de la figura 2.4, se miden las pendientes de las tangentes de la curva, lo cual proporciona valores de  $dX/d\theta$  para ciertos valores de  $\theta$ . Se calculan entonces, las velocidades  $N$  para cada punto con la expresión:

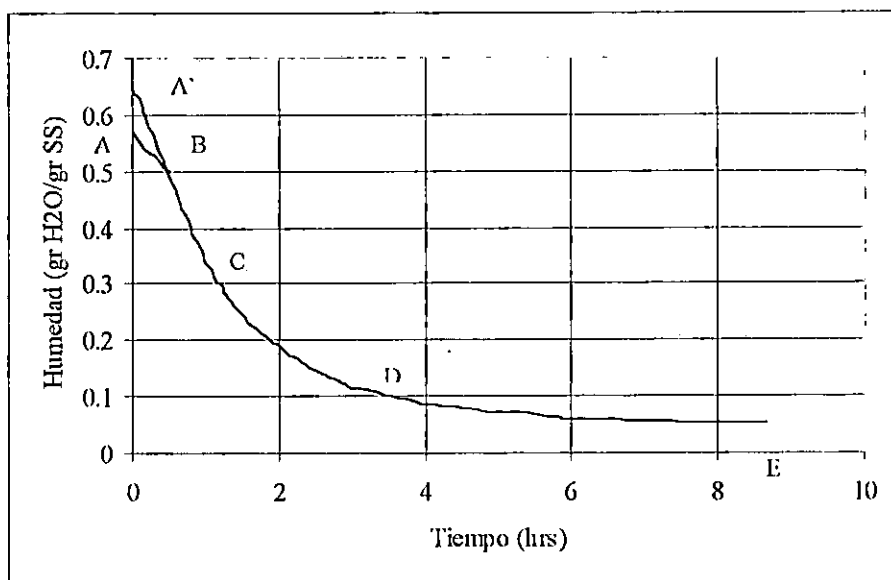
$$N = -\frac{SS}{A} \frac{dX}{d\theta} \quad (2.2)$$

donde:

$N$ : velocidad de secado en masa/tiempo área

$SS$ : peso de sólido seco

$A$ . área de la superficie expuesta al secado



**Fig. 2.4.** Curva de secado obtenida de datos experimentales en función de la humedad vrs tiempo (Perry, 1998).

La obtención de datos experimentales para cualquier material que pueda ser sometido a secado como la presentada en la figura 2.4, se hace énfasis que los sólidos deben perder humedad por:

- Evaporación desde una superficie saturada del sólido (tramo BC).
- A la cual sigue un período de evaporación de la superficie saturada que tiene un área gradualmente decreciente (tramo CD).
- Cuando el agua se evapora en el interior del sólido (tramo DE).

Entonces la curva de velocidad de secado, se obtiene graficando  $N$  en función del tiempo  $\theta$ , o la más utilizada  $N$  en función del contenido de humedad (figura 2.5).

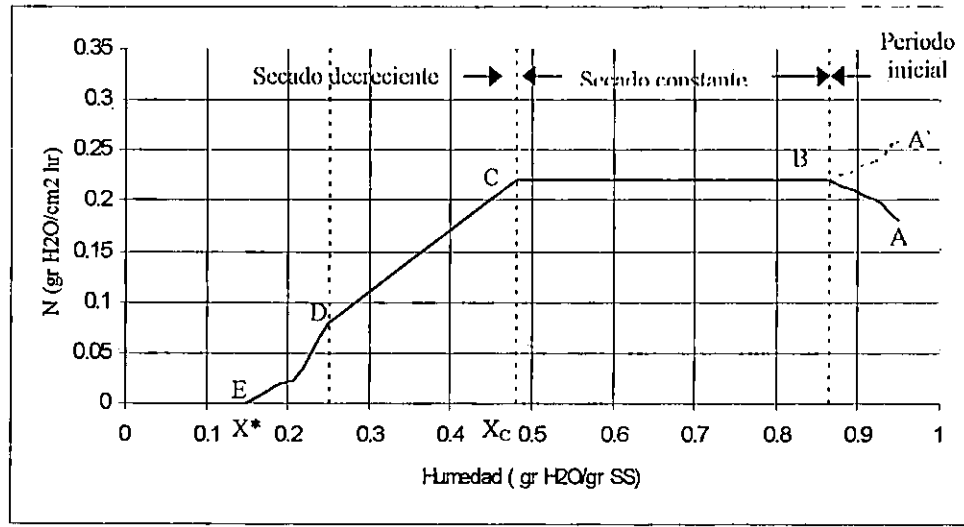


Fig. 2.5. Curva típica de velocidad de secado para condiciones de secado constante en función del contenido de humedad.

Esta curva refleja el paso por distintos períodos a medida que la humedad del sólido se reduce desde un elevado valor inicial hasta el pequeño valor final, los cuales son los siguientes:

- Período inicial.
- Período de secado constante.
- Período decreciente.

### 2.3.3.1. Período inicial o de ajuste.

Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior a la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación irá en aumento. Esto se representa en el tramo AB de la figura 2.5. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principiar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este periodo inicial de ajuste con estado inestable es bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado.

El mecanismo de secado en este período, generalmente el sólido húmedo está frío (línea AB), es decir que está por debajo de la temperatura de bulbo húmedo del aire, las cuales presenta las siguientes características:

- a) La transferencia de calor tiene lugar desde el aire caliente a la superficie húmeda y fría del sólido.
- b) La temperatura del agua aumenta y se evaporará después, tomando el calor latente del aire caliente.
- c) El calor se aprovecha para aumentar la temperatura de la superficie y la temperatura promedio del sólido.
- d) Después de cierto tiempo, el calor será igual al necesario para la evaporación del agua y cuando la temperatura de bulbo húmedo del aire sea aproximadamente igual a la temperatura de la superficie del sólido comienza el período de secado constante.

Por otro lado, si el sólido húmedo está caliente, el mecanismo es el mismo. Pero el calor latente es mayor que el calor transmitido al sólido, por lo que la velocidad de evaporación de secado disminuye hasta llegar a la velocidad de secado constante (Brown, 1975).

#### *2.3.3.2. Período de secado constante.*

En este período el movimiento de humedad dentro del sólido es lo bastante rápido para mantener una condición saturada en la superficie y la velocidad de secado se controla por medio de la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación.

El secado se desarrolla por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire en movimiento. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transferencia de calor y la temperatura de la superficie saturada permanece constante.

El mecanismo de eliminación de humedad equivale a la evaporación del agua y es esencialmente independiente de la naturaleza del sólido.

Si el calor se transfiere exclusivamente por convección, y en ausencia de otros efectos caloríficos, la temperatura de la superficie se acerca a la de bulbo húmedo. No obstante, cuando el calor se transmite por radiación, conducción o una combinación de ambos y por convección, la temperatura de la superficie saturada se ubica entre la del bulbo húmedo y la del punto de ebullición del agua. En tales condiciones, la velocidad de transmisión de calor se incrementa y se obtiene mayor velocidad de secado

Cuando el calor se transmite a un sólido húmedo, por conducción a través de superficies calientes y la transferencia de calor por convección es despreciable, los sólidos se acercan a la temperatura del punto de ebullición más que a la de bulbo húmedo.

Por tanto, la magnitud de la velocidad de secado constante depende de 3 factores:

- El coeficiente de transferencia de calor o transferencia de masa.
- El área expuesta al medio de secado.
- La diferencia de temperatura o humedad entre la corriente de gas y la superficie mojada del sólido.

Todos estos factores son variables externas, ya que el mecanismo interno del flujo del líquido no afecta la velocidad de secado constante (Perry, 1998).

En los sólidos porosos e insolubles, este mecanismo puede ser producido por la acción capilar. El punto C de la figura 2.5 corresponde al contenido *crítico de humedad* ( $X_c$ ), en este punto no existe suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. Este es el punto donde finaliza el período constante y comienza el período decreciente

La humedad crítica es la humedad promedio a lo largo del material en este período y su valor de velocidad de secado ( $N_c$ ) depende de:

- a) Espesor del material.
- b) Factores que influyen en el movimiento de la humedad (externos).
- c) Los gradientes resultantes dentro del sólido.

Lo anterior refleja que un aumento de  $X_c$  se aumenta la velocidad de evaporación del secado y el espesor de la masa que se está secando.

#### 2.3.3.3. *Periodo decreciente.*

Cuando el contenido decreciente de humedad es superior al contenido crítico, todo el proceso de secado se desarrollará en condiciones de secado constante. Por otro lado, si el contenido inicial de humedad es inferior al crítico, todo proceso de secado se desarrollará en el período de velocidad decreciente. Este período se divide en dos zonas:

- a) Secado de superficie no saturada.
- b) Movimiento interno de la humedad.

En la primera zona, la superficie comienza a agotarse de líquido debido a que la velocidad de movimiento de este hacia la superficie es menor que la velocidad de transferencia de masa desde la superficie, hasta que en el punto D no existe un área significativa de superficie saturada de líquido. La parte de la superficie que está saturada se seca por transferencia convectiva de calor desde la corriente del gas secante y transferencia de masa hacia la misma. El vapor se difunde desde los niveles interiores de la muestra hasta la parte de la superficie que no está saturada y continua su difusión hacia la corriente gaseosa. Este mecanismo es muy lento en comparación con la transferencia convectiva desde la superficie saturada (Foust, 1987).

Conforme prosigue el secado, se llega a un punto en que la superficie de evaporación es insaturada. El punto de evaporación se desplaza dentro del sólido y el proceso de secado entra en el segundo período de velocidad decreciente, tramo DE de la figura 2.5.

La velocidad de secado está regida por la velocidad del movimiento interno de la humedad y la influencia de las variables externas va en disminución. Cuando se efectúa un secado a contenidos reducidos de humedad, este periodo predomina casi siempre en la determinación del tiempo total del secado (Perry, 1998).

#### Mecanismo interno de la circulación del líquido.

La estructura del sólido determina el mecanismo por el cual puede ocurrir la circulación o flujo interno del líquido. Estos mecanismos pueden incluir:

- a) Difusión de sólidos homogéneos continuos.
- b) Flujo capilar en sólidos granulados y porosos.
- c) Flujo provocado por contracción y presión.
- d) Flujo producido por gravedad
- e) Flujo originado por una secuencia de vaporización y condensación.

En este período decreciente, el secado de un sólido se determina por un estudio de los gradientes internos de humedad, lo cual es extremadamente difícil hacer la determinación experimental de gradientes de humedad dignos de confianza (Perry, 1998).

Hougen, McCauley y Marshall, en su trabajo de investigación presentado en AIChE, 1940; analizaron las condiciones en que se pueden separar un flujo capilar y de difusión de un sólido en vías de secado. Estos autores clasificaron los sólidos basándose en el flujo capilar y la difusión de la siguiente manera:

*Flujo Capilar:* La humedad contenida en los intersticios de los sólidos, como líquido en la superficie o como humedad libre en las cavidades celulares, se desplaza por gravedad y capilaridad, a condición de que existan canales para un flujo continuo.

El flujo de líquido debido a la capilaridad se aplica a líquidos que no están en solución y a toda humedad por encima del punto de saturación de fibra, como sucede en textiles, papel y

pieles, y a toda humedad por encima del contenido de la humedad de equilibrio, como sucede en polvos finos y sólidos granulares.

Aunque el período de velocidad decreciente divide a las dos regiones mencionadas con anterioridad, por lo general en sólidos granulares o cristalinos se aproxima a una línea recta. en una base de velocidad contra contenido de humedad

*Difusión de vapor:* La humedad se desplaza por acción de la difusión de vapor a través del sólido, estableciéndose un gradiente de temperatura por calentamiento, creando un gradiente de presión. La vaporización y la difusión de vapor ocurren en cualquier sólido en el cual se realice el calentamiento en una superficie y el secado en la otra y en donde el líquido quede aislado entre los gránulos del sólido.

*Difusión de líquidos:* El movimiento de líquidos por difusión en sólidos se restringe al contenido de humedad de equilibrio por debajo del punto de saturación atmosférica y a sistemas en que la humedad y los sólidos son mutuamente solubles. El primer caso se aplica a las últimas etapas del secado de arcillas, almidones, harinas, textiles, papel y madera; la segunda clase incluye el secado de jabones, gomas, gelatinas y pastas. (AICHE, 1940)



### 2.3.4. METODOS DE CALCULO PARA EL PERIODO DE SECADO CONSTANTE.

El factor más importante en los cálculos es probablemente, la duración del tiempo requerido para secar un material a partir de un contenido inicial de humedad  $X_0$ , hasta alcanzar un contenido de humedad  $X_f$ . Para el secado en el periodo de velocidad de secado constante, es posible estimar el tiempo de secado mediante:

- a) Curvas de secado obtenidas con lotes experimentales.
- b) Predicciones de transferencia de calor y masa.

#### 2.3.4.1. Método de curva de secado.

Para estimar el tiempo de secado de determinado lote de material, el mejor método consiste en obtener datos experimentales reales bajo condiciones de alimentación, área superficial expuesta, velocidad del gas, temperatura y humedad, que sean, en esencia, las mismas que tendrá el secador que se usaran a escala piloto o industrial. De esta manera, el tiempo requerido para el período de velocidad constante puede determinarse directamente con la curva de secado de contenido de humedad en función del tiempo (Geankoplis, 1986).

En lugar de la curva de secado, es posible emplear la curva de velocidad de secado. Mediante la definición de esta velocidad dada por la ecuación 2.2; esta expresión puede reordenarse e integrarse con respecto al intervalo para secar desde  $X_0$  a  $\theta_1 = 0$  hasta  $X_f$  a  $\theta_2 = \theta$ :

$$\theta = \int_{\theta_1=0}^{\theta_2=\theta} d\theta = - \frac{SS}{A} \int_{X_0}^{X_f} \frac{dX}{N} \quad (2.3)$$

La expresión anterior da origen a dos casos:

Caso 1: Si el secado se verifica dentro del período de velocidad de secado constante, de tal manera que tanto  $X_o$  y  $X_f$  sean mayores que el contenido de humedad crítica  $X_c$ , entonces  $N = N_c = \text{constante}$ . Integrando la ecuación 2.3, resulta:

$$\theta = \frac{SS}{A} \frac{(X_o - X_f)}{N_c} \quad (2.4)$$

Caso 2: Si el secado se da dentro del período de secado constante de tal manera que  $X_o$  sea mayor que  $X_c$ ; todo el período de secado constante será:

$$\theta = \frac{SS}{A} \frac{(X_o - X_c)}{N_c} \quad (2.5)$$

#### 2.3.4.2. Método de predicciones de coeficientes de transferencia de masa y calor.

Como se mencionó en el numeral 2.3.3.2, la velocidad del movimiento de humedad dentro del sólido es suficiente para mantener la superficie saturada, dándose la evaporación superficial de la humedad no ligada.

La velocidad de eliminación de vapor de agua (secado) está controlada por la velocidad de transferencia de calor ( $q$ ) hasta la superficie de evaporación, que suministra el calor latente de evaporación para el líquido. Cuando se opera en estado estable, la velocidad de transferencia de masa equivale a la velocidad de transferencia de calor.

En fenómenos de convección, los coeficientes de transmisión de calor dependen:

- a) La geometría del sistema.
- b) La velocidad del gas sobre la superficie de evaporación.
- c) Propiedades comunes del gas secante.

Para calcular las velocidades de secado, casi siempre se prefiere utilizar los coeficientes de transmisión de calor, debido a que usualmente son más seguros que los coeficientes de transferencia de masa. *Cuando se calculan los coeficientes de transferencia de masa en experimentos de secado, se acostumbra inferir la presión parcial en la superficie tomando como base la temperatura medida o calculada de la superficie de evaporación. Los errores pequeños en la temperatura tienen efectos despreciables en los coeficientes de transmisión de calor, pero introducen errores relativamente grandes en la presión parcial y por tanto, en el coeficiente de transferencia de masa.*

Considerando la figura 2.6, se muestra un material sólido que se está secando por medio de una corriente de aire. La velocidad total de transmisión de calor hasta la superficie de secado es:

$$q = q_c + q_R + q_K \quad (2.6)$$

donde:

$q_c$ : es la transferencia convectiva de calor desde el gas a  $T$  hasta la superficie sólida a  $T_s$ .

$q_R$ : es la transferencia de calor desde la superficie radiante  $T_R$  hasta  $T_s$ .

$q_K$ : es la velocidad de transferencia de calor por conducción.

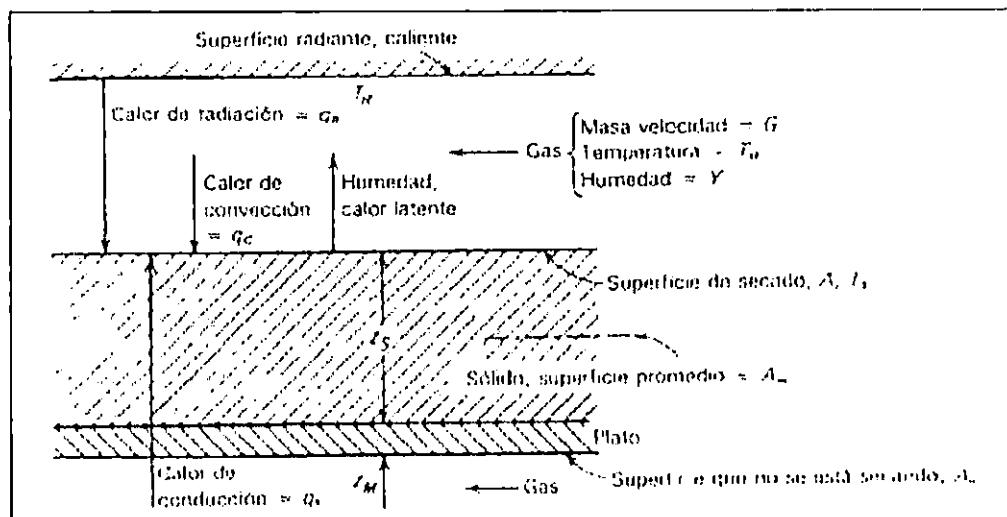


Fig. 2.6. Transferencia de calor y masa en el secado de un sólido por la superficie exterior. (Treybal, 1988)

### Efecto de la convección.

La velocidad de transferencia convectiva de calor en la superficie está controlado mediante el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $hc$ ,

$$q_c = hc (T - T_s) A \quad (2.7)$$

donde  $A$  es el área de la superficie expuesta al secado,  $T$  es la temperatura de bulbo seco del flujo aire sobre la superficie expuesta al secado y  $T_s$  es la temperatura de la superficie de sólidos húmedos. En muchos casos, el coeficiente de transmisión de calor  $hc$  según Friedman y Muller (1951) se puede expresar como:

$$hc = \frac{\alpha G^n}{D_c^\gamma} \quad (2.8)$$

siendo  $G$ : gasto de masa del gas secante en masa/tiempo área,  $D_c$ : dimensión característica del sistema en unidades de longitud y  $\alpha$ ,  $n$  y  $\gamma$  son constantes empíricas.

En ausencia de datos específicos que puedan aplicarse al coeficiente de transferencia de calor para el caso de *flujo paralelo* se tomará para fines de cálculo:

$$hc = \frac{8.8 G^{0.8}}{D_c^{0.2}} \quad (2.9)$$

en donde los datos experimentales se evaluaron en conformidad con el factor  $j$  de Chilton Colburn acostumbrado, y en donde se incorporaron valores promedio del aire a 370 K (96°C).

Los datos experimentales para secar en superficies planas se correlacionan utilizando el diámetro equivalente del canal del flujo o la longitud de la superficie de vaporización como la dimensión característica de longitud en el número de Reynolds. El diámetro equivalente apropiado depende por lo menos, de la geometría, la aspereza de la superficie y las condiciones de flujo corriente arriba de la superficie de evaporación.

Para la mayor parte de los cálculos de secado en bandeja, se debe emplear el diámetro equivalente (4 veces el área de corte transversal dividido entre el perímetro de canal de flujo).

Tsao y Wheelock (1967), correlacionaron matemáticamente el coeficiente de transferencia de calor para temperaturas de aire entre 45 – 150°C, y una velocidad-masa  $G$  de 2,450 – 29,300 kg / hr m<sup>2</sup> (500 – 600 lbs /hr pie<sup>2</sup>) o una velocidad de 0.61 – 7.6 m/s (2.0 – 25 pie/s) :

$$hc = 0.0204 G^{0.8} \quad (\text{SI}) \quad (2.10)$$

$$hc = 0.0128 G^{0.8} \quad (\text{inglesas}) \quad (2.11)$$

donde, en unidades SI,  $G$  es  $v\rho$  kg / hr m<sup>2</sup> y  $hc$  esta en W/m<sup>2</sup> K. En unidades inglesas,  $G$  esta en lbs / hr pie<sup>2</sup> y  $hc$  en BTU /hr pie<sup>2</sup>. Estas ecuaciones generalmente son exactas si se considera que la transferencia de calor es exclusivamente por convección, aunque se incurre en poco error si se toma en cuenta la transferencia de calor por conducción.

#### Efecto de la radiación.

La transferencia de calor por radiación puede ser estimada por:

$$q_R = h_R (T_R - T_S) A \quad (2.12)$$

donde  $h_R$  es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, definido por McAdams (1947):

$$h_R = \epsilon (5.729 \times 10^{-8}) \frac{(T_R^4 - T_S^4)}{(T_R - T_S)} \quad (2.13)$$

Nótese que en la ecuación 2.13  $T_S$  y  $T_R$  están K;  $T_R$  es la temperatura de la superficie radiante,  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie que se esta secando y  $h_R$  en Watt / m<sup>2</sup> K. En el cuadro I.3 del anexo III se presenta una tabla de emisividad para fuente radiante y receptora.

#### Efecto de la conducción:

En la transferencia de calor por conducción desde el fondo de la bandeja, primero se da una transferencia por convección desde el gas al metal, después por conducción a través del metal y finalmente, por conducción a través del sólido. La radiación del fondo de la bandeja suele ser bastante pequeña, sobre todo cuando dicha bandeja esta encima de otra, por lo que se desprecia este efecto y además si la temperatura del gas no son muy altas, la radiación

desde la superficie a la bandeja será pequeña. La velocidad de transferencia de calor por conducción nos queda:

$$q_k = U_k (T - T_s) A \quad (2.14)$$

siendo  $q_k$  la velocidad de transferencia de calor por conducción y  $U_k$  es el coeficiente global de transferencia de calor por conducción dado por:

$$U_k = \frac{1}{\left(\frac{1}{hc}\right)\left(\frac{A}{A_u}\right) + \left(\frac{z_M}{k_M}\right)\left(\frac{A}{A_u}\right) + \left(\frac{z_s}{k_s}\right)\left(\frac{A}{A_m}\right)} \quad (2.15)$$

donde  $hc$  es el coeficiente de convección para el plato;  $k_M$  y  $k_s$  son las conductividades térmicas del material del plato y del sólido que se está secando;  $A_u$  y  $A_m$ , la superficie que no se está secando y el área promedio del sólido que se está secando, respectivamente;  $z_M$  y  $z_s$  son el espesor de la bandeja y sólido respectivamente.

El valor de  $z_s$  se reduce a la mitad del espesor de la bandeja, cuando la transferencia de calor y la velocidad de evaporación se realiza simultáneamente en la parte superior e inferior de la bandeja.

De otra manera, la velocidad de evaporación del agua también puede ser expresada en términos de transferencia de masa, ver figura 2.6:

$$N_c = k_g (P_s - P) = k_Y \frac{M_B}{M_a} (Y_s - Y) \quad (2.16)$$

siendo  $N_c$ : el flujo específico del vapor de agua desde la superficie hasta la corriente de aire que fluye en moles de agua / tiempo x área;  $k_g$ ,  $k_Y$  son los coeficientes de transferencia de masa en moles / tiempo x área x (presión) y moles / tiempo x área x (razón mol) respectivamente.  $P_s$  es la presión en equilibrio del agua evaluada a  $T_s$ ,  $P$  es la presión

parcial del agua en el seno del aire que fluye,  $M_a$ ,  $M_B$  son los peso moleculares del agua y aire respectivamente;  $Y_s$  es la humedad del aire en la superficie de los sólidos húmedos y  $Y$  es la humedad del agua en el seno del aire medidos a  $T_s$  y  $T$  respectivamente.  $Y_s$  y  $Y$  están dadas en unidades de masa de agua / masa de aire seco.

Al vaporizar una determinada cantidad de agua, se establece un equilibrio dinámico entre la velocidad de transmisión de calor al material y la velocidad de eliminación de vapor desde la superficie por lo que al igualar la ecuación 2.6 y 2.16, resulta:

$$q = M_a N_c \lambda_s A \quad (2.17)$$

donde  $\lambda_s$  es el calor latente del agua medidos a la temperatura  $T_s$ . Combinando las ecuaciones 2.6, 2.7, 2.12, 2.14 y 2.16, se puede calcular la rapidez de secado:

$$N_c = \frac{q}{A \lambda_s} = \frac{(hc + U_K)(T - T_s) + h_R(T_R - T_s)}{\lambda_s} = k_Y M_B (Y_s - Y) \quad (2.18)$$

Para facilitar la resolución de la ecuación 2.18, puede reordenarse como sigue:

$$\frac{(Y_s - Y)\lambda_s}{hc/k_Y} = \left(1 + \frac{U_K}{hc}\right) (T - T_s) + \frac{h_R}{hc} (T_R - T_s) \quad (2.19)$$

La relación  $hc/k_Y$  es aplicable al flujo de aire en la temperatura de bulbo húmedo siendo, 950 Joule / kg K que es la misma que el calor húmedo del gas  $C_s$ , tal como se presenta en la sección 1.4.10. La expresión 2.19 da temperatura de superficie  $T_s$  mayores que las de bulbo húmedo  $T_w$ .

Si se desprecia el efecto de transferencia de calor por conducción y radiación, la expresión de la ecuación 2.19 se reduce a la temperatura de bulbo húmedo para el sistema aire-agua (ecuación 1.20). Por tanto la temperatura de la superficie del sólido  $T_s$ , se encuentra a la temperatura de bulbo húmedo del aire durante el período de secado constante. El tiempo de secado se puede estimar para este caso, sustituyendo la ecuación 2.18 en la 2.5 resulta:

$$\theta = \frac{SS \lambda_w (X_o - X_c)}{A hc (T - T_w)} = \frac{SS (X_o - X_c)}{A k_Y M_B (Y_w - Y)} \quad (2.20)$$

$T_w$  es la temperatura de bulbo húmedo de aire circulante y  $Y_w$  es la humedad de saturación a  $T_w$ .

Si se considera que existen los 3 tipos de transmisión de calor y de nuevo sustituyendo 2.18 en 2.5 nos queda:

$$\theta = \frac{SS \lambda_s (X_o - X_c)}{A[(hc + U_k)(T - T_s) + h_r(T_r - T_s)]} = \frac{SS(X_o - X_c)}{A k_y M_b (Y_s - Y)} \quad (2.21)$$

En el caso de secado en bandejas, Schurr y Wells desarrollaron una expresión para el cálculo del cambio de la humedad con respecto al tiempo, suponiendo que el volumen del sólido permanece inalterable durante el secado. La ecuación 2.16 se transforma (Schurr, 1970):

$$\frac{dX}{d\theta} = - \frac{h}{\rho_s \lambda e} (T - T_s) \quad (2.22)$$

en donde:

$dX/d\theta$  : es el cambio de humedad con respecto al tiempo (kg de agua / kg sólido seco-seg).

$h$  : coeficiente de transmisión total de calor (Joule/m<sup>2</sup> seg. K)

$\rho_s$ : densidad volumétrica del material seco (kg/m<sup>3</sup>).

$e$  : espesor de lecho (m).

$\lambda$ : es el calor latente de vaporización (Joule/kg)

El coeficiente total de transferencia de calor propuesto por Shepherd, Brewer y Hadlock (AICHE, 1938), consideraron que el calor llega a la superficie de evaporación a través de las paredes de la bandeja por conducción y radiación, atravesando el material mojado.

$$ht = (hc + h_r) \left[ 1 + \frac{Aq}{1 + \frac{d(hc + h_r)}{k}} \right] \quad (2.23)$$



$h_t$ : es el coeficiente total de transferencia de calor (Joule/m<sup>2</sup> seg K).

$A_q$ : es la relación de la superficie exterior no humedecida respecto al área de la superficie de evaporación.

$d$ : profundidad del material de la bandeja (m).

$k$ : conductividad térmica del material húmedo (Joule/seg m<sup>2</sup> (K/m))

El valor de  $h_c$  debe ser corregido en lo que respecta a la emisividad de la superficie. Para bandejas aisladas, es preciso utilizar el promedio aritmético del área no mojada tanto interna como externa.

### 2.3.5. METODOS DE CALCULO PARA EL PERIODO DE SECADO DECRECIENTE.

#### 2.3.5.1. Método que emplea una integración gráfica.

Treybal en su libro de transferencia de masa, hace énfasis que el tiempo de secado para cualquier región entre el inicio del periodo decreciente y la humedad final adecuada para el sólido  $X_f$  viene dada por:

$$\theta = - \frac{SS}{A} \int_{X_c}^{X_f} \frac{dX}{N} \quad (2.24)$$

Esta ecuación puede integrarse gráficamente para cualquier forma de la curva de secado de velocidad decreciente.

Para el caso de que la línea CD de la figura 2.6 se asemeje a una línea recta, es decir el primer periodo decreciente, al integrar la ecuación 2.24 desde  $X_1 = X_c$ ,  $N_1 = N_c$ ; hasta  $X_f = X_D$ ,  $N_f = N_D$  resulta:

$$\theta = \frac{SS}{A} \frac{(X_c - X_D)}{N_c - N_D} \ln \frac{N_c}{N_D} \quad (2.26)$$

En ausencia de datos y si todo el período decreciente tiende a una línea recta, es decir tramo CE de la figura 2.6 sustituyendo en la ecuación 2.26:

$$\theta = \frac{SS}{A} \frac{(X_c - X^*)}{N_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} \quad (2.27)$$

### 2.3.5.2. Método utilizando ecuaciones basadas en difusión y movimiento capilar.

#### Difusión líquida y humedad en el secado.

Cuando la difusión líquida de la humedad controla la velocidad de secado en el período de secado decreciente, pueden aplicarse las ecuaciones de difusión molecular, la segunda ley de fick para difusión en estado inestable puede escribirse como (Perry, 1998)

$$\frac{dX}{d\theta} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial Z^2} \quad (2.28)$$

donde  $D_L$  es el coeficiente de difusión líquida en  $m^2/hr$  y  $Z$  es el espesor del sólido en m.

Este tipo de difusión suele ser característico de los secados relativamente lentos de materiales no granulares como jabón, gelatina, etc., así como en las etapas del secado de agua ligada en arcillas, madera, textiles, cuero, papel, alimentos, etc.

Una de las principales dificultades para analizar los datos de secado por difusión consiste, en que la distribución inicial de la humedad no es uniforme en todo el sólido al principio (cuando este período de velocidad decreciente va precedido por otro de secado a velocidad constante).

Durante el secado de tipo de difusión, *la resistencia a la transferencia de masa del vapor de agua desde la superficie suele ser bastante pequeña y la difusión en el sólido controla la velocidad de secado.*

Suponiendo que la distribución inicial de humedad es uniforme al tiempo  $\theta = 0$ , la ecuación 2.28 puede integrarse para obtener la siguiente expresión:

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \left[ e^{-D_L \theta \left(\frac{\pi}{2z}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L \theta \left(\frac{\pi}{2z}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L \theta \left(\frac{\pi}{2z}\right)^2} + \dots \right] \quad (2.29)$$

donde la nomenclatura definida en la sección 2.3.4, a excepción de  $z$ , que es la mitad del espesor del lecho cuando el secado se verifica desde las caras paralelas superior e inferior, caso contrario  $z$  es el espesor total del lecho cuando el secado sólo se realiza desde la cara superior y  $X$  es la humedad promedio en el tiempo  $\theta$ .

La ecuación 2.29 supone que  $D_L$  es constante, pero este rara vez lo es, ya que varía con el contenido de agua, la temperatura y la humedad. Para tiempos de secado largos, el único término de la ecuación 2.29 que tiene importancia es el primero; la expresión se transforma:

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \left[ e^{-D_L \theta \left(\frac{\pi}{2z}\right)^2} \right] \quad (2.30)$$

despejando el tiempo de secado,

$$\theta = \frac{4z^2}{\pi^2 D_L} \ln \frac{8(X_0 - X^*)}{\pi^2 (X - X^*)} \quad (2.31)$$

Si el mecanismo de difusión comienza en  $X_0 = X_c$ , y diferenciando 2.31 con respecto al tiempo y reordenando,

$$\frac{dX}{d\theta} = -\frac{\pi^2 D_L (X - X^*)}{4z^2} \quad (2.32)$$

multiplicando ambos lados por  $-SS/A$ ,

$$N = \frac{\pi^2 SS D_L}{4z^2 A} (X - X^*) \quad (2.33)$$

Las ecuaciones 2.32 y 2.33 indican que, cuando la difusión interna es el efecto que controla durante periodos prolongados, la velocidad de secado es directamente proporcional a la humedad instantánea  $X$  y a la difusividad del líquido, pero es inversamente proporcional al

cuadrado del espesor. Por consiguiente la velocidad de evaporación es independiente de la velocidad del gas y de la humedad relativa (Copley, 1973).

#### Movimiento capilar de la humedad durante el secado.

El agua puede fluir desde altas hasta bajas regiones de concentración como resultado de una acción capilar en lugar de difusión, cuando los tamaños de los poros de los materiales granulares son adecuados para ello.

La teoría capilar supone que un lecho empacado de esferas no porosas contiene espacios vacíos entre sí, las cuales se llaman poros. A medida que se evapora el agua, las fuerzas capilares se ponen en acción debido a la tensión superficial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas proporcionan el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie de secado.

Para deducir una ecuación de velocidad de secado cuando el flujo se efectúa por movimiento capilar, puede usarse una forma modificada de la ecuación de Poiseuille para flujo laminar, en combinación con la ecuación de fuerza capilar. Si el movimiento de la humedad obedece a las ecuaciones de flujo capilar, la velocidad de secado  $N$  variará en forma lineal con  $X$  (sección 2.3.5.1). El mecanismo de evaporación en este período es igual al que prevalece durante el período de velocidad constante, los efectos de las variables de las variables del gas de secado, tales como velocidad del gas, temperatura, humedad del gas, etc., serán los mismos que para el período de secado de velocidad constante.

Por la ecuación 2.27, expresión del tiempo de secado cuando  $N$  varía linealmente con la  $X$  y si expresamos el peso de sólido seco en función del espesor del sólido ( $z$ ), la densidad del sólido seco ( $\rho_s$ ) y el área expuesta al secado ( $A$ ). Sustituyendo en 2.27 resulta:

$$\theta = \frac{z \rho_s (X_c - X^*)}{N_c} \ln \frac{(X_c - X^*)}{(X_f - X^*)} \quad (2.34)$$

sustituyendo la ecuación 2.16 en 2.34 resulta:

$$\theta = \frac{z \rho_s \lambda_s (X_c - X^*)}{(hc + U_K)(T - T_s) + h_R (T_R - T_s)} \ln \frac{(X_c - X^*)}{(X_f - X^*)} \quad (2.35)$$

Las ecuaciones 2.34 y 2.35 indican que si el flujo capilar es el factor que controla durante el período decreciente, la velocidad del secado es inversamente proporcional al espesor. Caso contrario sucede con el tiempo que es directamente proporcional al espesor.

Si la ecuación 2.35, los efectos de conducción y radiación son despreciables en comparación con los convectivos,  $U_K$  y  $h_R = 0$  (Geankoplis, 1988).

### 2.3.6. EFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO SOBRE EL PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE.

Anteriormente se mencionó que es preferible emplear mediciones experimentales de la velocidad de secado ignorando las ecuaciones empíricas. Sin embargo, estas ecuaciones son bastantes útiles para predecir el efecto de los cambios de las variables del proceso de secado, cuando se dispone de datos experimentales limitados (Badger, 1970).

#### 2.3.6.1. Efecto de la velocidad del aire.

Cuando no hay transferencia de calor por conducción y radiación, la velocidad  $N_c$  de secado es proporcional a  $h_c$  y por tanto, a  $G^{0.8}$ , tal como lo expresa la ecuación 2.9. El efecto de la velocidad es menos importante, cuando hay conducción y radiación.

#### 2.3.6.2. Efecto de la humedad del gas.

Si la humedad del gas  $Y'$  disminuye para determinado valor de temperatura  $T$  en el gas, la temperatura de bulbo húmedo  $T_w$  o  $T_s$ , también disminuirá. La velocidad de evaporación  $N_c$  varía directamente con  $Y'_s - Y'$  por tanto  $N_c$  aumentará.

Por ejemplo si las condiciones originales son  $N_{c1}$ ,  $T_1$ ,  $T_{s1}$ ,  $Y'_{s1}$ ,  $Y'_{s1}$ , si cambia de  $Y'_{s1}$  a  $Y'_{s2}$  y  $Y'_{s1}$  varia a  $Y'_{s2}$ ,  $N_{c2}$  será:

$$N_{c2} = N_{c1} \frac{\lambda_{s1}}{\lambda_{s2}} \frac{T_2 - T_{s2}}{T_1 - T_{s1}} = N_{c1} \frac{Y'_{s2} - Y'_2}{Y'_{s1} - Y'_1} \quad (2.36)$$

### 2.3.6.3. *Efecto de la temperatura del gas.*

Al aumentar la temperatura del aire, aumenta la cantidad  $T-T_s$ ; por lo tanto, aumenta también  $N_c$ . En ausencia de radiación y despreciando la variación del calor latente en rangos moderados de temperatura,  $N_c$  es directamente proporcional a  $T-T_s$ .

### 2.3.6.4. *Efecto del espesor del lecho del sólido que se está secando.*

Cuando solo hay transferencia de calor por convección, la velocidad  $N_c$  es independiente del espesor  $z_s$  del sólido. Sin embargo el tiempo necesario para secar entre los contenidos de humedad fijos  $X_o$  y  $X_f$  será directamente proporcional al espesor (Treybal, 1988).

### 2.3.6.5. *Efecto de la contracción.*

Un factor importante para el control de la velocidad de secado es la contracción del sólido a medida que la humedad del sólido va disminuyendo. Los diferentes materiales difieren de esta propiedad. Los sólidos rígidos, porosos o no porosos, no se contraen apreciablemente durante el secado, pero los materiales coloidales y fibrosos sufren grandes contracciones a medida de que la humedad se elimina de ellos. Esto produce tres efectos (Badger, 1970):

- a) Se da una variación de la superficie del material por unidad de peso, lo cual en muchos casos no se conoce completamente. Esto se cumple en materiales vegetales y productos alimenticios, en los que el efecto de la contracción es el de alterar mucho la extensión de la superficie expuesta al secado.
- b) Puede desarrollarse una capa endurecida sobre la superficie, que impide el flujo de humedad, sea en forma líquida o vapor. Esto hace que el secado sea lento ya que la humedad no se mueve fácilmente desde el interior del sólido a la superficie o al medio ambiente que se efectúa la evaporación. Ejemplos de ello se encuentran los jabones, arcillas, granos tales como el maíz, maicillo, etc.

- c) El alabeo o agrietamiento del material o cualquier otro cambio en la estructura total, por ejemplo la madera.

Para materiales que tienden al alabeo o agrietamiento del material o para materiales que tienden a desarrollar una capa dura sobre la superficie, algunas veces es de desear efectuar *el secado con aire húmedo*. En este caso se reduce considerablemente la diferencia de humedad entre el aire y la superficie del sólido, lo cual disminuye la velocidad de evaporación (secado lento).

### **3.0 SELECCIÓN DE MATERIALES SOMETIDOS A SECADO AL NIVEL DE LABORATORIO.**

#### **3.1. GENERALIDADES DE LA MATERIA PRIMA SELECCIONADA.**

Esta parte preliminar se basa en la caracterización de la materia prima, es decir de los materiales que fueron propuestos inicialmente al proceso de secado tienen en consideración las características de materiales que se manejan en los secadores de bandeja con circulación directa tal como se presenta en la sección 1.2.2, cuadro I.2 del anexo I en la “clasificación de secadores por las características de manejo y propiedades físicas del material mojado”, que son apropiados para materiales sólidos, cristalinos y/o fibrosos. Estos se presentan a continuación:

- Silica gel.
- Piña.
- Papaya.
- Arena.
- Cebolla.
- Ajo.
- Yerba Buena
- Cilantro.

La lista de los materiales anteriores se basa en las características de cada sustancia los cuales pueden ser sujetos a agroindustrializarse tales como: piña, papaya, cebolla, yerba buena, ajo y cilantro; por lo que pueden ser deshidratados por su alto contenido de humedad, sin alterar la calidad nutritiva de estos.

Para la silica gel y la arena, por ser materiales higroscópicos la variación del contenido de humedad es aún mayor, los cuales hace que estos materiales por su naturaleza sean idóneos para ser sometidos a secado, que servirán para el diseño y construcción de los secadores.



De estos materiales se seleccionaron solamente 3, las cuales fueron la base para la obtención de parámetros, tales como: tiempo de secado, temperatura, velocidad de flujo de aire, espesor del lecho, humedad inicial, humedad crítica, humedad final de sólidos, velocidad de evaporación (que son resumidas en las curvas de secado), etc., que sirvieron para elaborar el diseño del sistema de secado al nivel de planta piloto.

Todas las muestras que se sometieron preliminarmente a secado fueron proporcionadas por el grupo de trabajo de graduación, consistiendo en muestras no mayores de 1 libra. Para el caso de los materiales orgánicos como: piña, papaya, cebolla, ajo, yerba buena y cilantro fueron seleccionadas y obtenidas al azar en los mercados municipales de ayutuxtepeque y mejicanos. Para los materiales inorgánicos (silica gel y arena), el primero fue proporcionado por los laboratorios de la escuela de Ingeniería Química, el cual es de calidad reactivo utilizado en los desecadores y el segundo fue obtenido de un lote de construcción civil.

### 3.2. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES QUE SERAN SOMETIDOS A SECADO.

Para la realización de la selección de los materiales, se llevaron a cabo varias pruebas preliminares que serán críticas en el secado. De estos resultados, servirán para definir cuales materiales serán basados en el diseño del secador al nivel de planta piloto.

Las pruebas se basaron en aspectos cualitativos y la forma física de la materia prima seca o deshidratada. Algunos de tales aspectos fueron:

- a) Consistencia del material seco; es decir su forma física después de secado debe ser visualmente buena y agradable (materiales orgánicos), la reducción en la dimensión de la superficie y si existe presencia de alabeo o agrietamiento.
- b) Desprendimiento de líquidos orgánicos depositados en el recipiente durante el secado.
- c) Tendencia del material a acelerar el proceso de corrosión de los recipientes (bandejas).
- d) Por el contenido de H<sub>2</sub>O que presentan los materiales. Esto se efectuó de manera bibliográfica, por las características físicas, químicas y biológicas de ellos.
- e) La descomposición por reacciones enzimáticas que sufren algunos materiales orgánicos originando su *empardeamiento*.

De cada uno de los materiales propuestos, se observaron los siguientes fenómenos:

- Silica Gel: por ser un material granular (calidad reactivo) y de naturaleza higroscópica, las variaciones de humedad dentro del sólido pueden ser determinadas sin ninguna dificultad, debido a la gran cantidad de poros situados en la superficie del grano. Por lo tanto es un material idóneo para diseñar el secador al nivel de planta piloto con efectos netamente académicos.

Por ser de naturaleza inorgánica, no presenta alabeo y/o agrietamiento, ni reducción en el tamaño del grano por el aumento de la temperatura.

- Arena : también es un material granular inorgánico. El tamaño de partícula seleccionado para secado fue de 1.168 mm, es decir que el material se hizo pasar por un tamiz de malla 28 (mesh).

Al someterlo a secado las variaciones de humedad son medibles, pero son menos cuantificables que la sílica gel para un mismo tiempo de secado. Otra observación para la selección fue que la arena presentaba un secado uniforme en la superficie y en el seno del sólido permanecía completamente húmedo, lo cual se debe a que al alcanzar el período decreciente donde prevalecen las fuerzas capilares, existió un retardo de la velocidad de transferencia de masa con respecto a la velocidad de transferencia de calor, requiriendo mayor tiempo de secado que el de la sílica gel.

- Cebolla y Ajo : son materiales orgánicos, fibrosos que por tener características similares, presento muy buena consistencia, es decir que estos al secarse eran completamente uniformes.

Se observó un buen grado de contracción para los 2 materiales, se dió un cambio notorio de color en la cebolla (es decir, de blanco opaco a ligeramente amarillo), no así el ajo que el cambio fue mínimo.

A temperaturas superiores a 70°C, ambos materiales tienden a pegarse con las bandejas, desprendiendo aceites orgánicos que se acumulaban en los recipientes de secado. Por tanto las variaciones de humedad para ambos materiales pueden ser determinadas sin dificultad alguna cuando se sometan a secado, debido al alto contenido de humedad que presentan.

- Cilantro y Yerba Buena : también son materiales orgánicos, utilizados generalmente en el arte culinario, preparaciones farmacéuticas, etc. Por su alto contenido de H<sub>2</sub>O pueden ser sometidos a secado, con la agravante que se necesita intervalos de mediciones mayores que los demás materiales.

Debido a su naturaleza, las temperaturas máximas permisibles para deshidratación oscilan en 50°C (Tiscorna, 1975; Montaldo, 1981), por lo que los tiempos de secado

son rápidos (aprox. 2 hrs). Otra característica notable es que al momento de someterlo a secado, existía un desprendimiento de aceites orgánicos que se depositaban en el recipiente.

- Piña : Por el alto contenido de H<sub>2</sub>O (85.3%), ácidos débiles, azúcares, etc. Al deshidratarse su volumen se reduce aproximadamente en un 75%, lo que también acelera el proceso de corrosión de los recipientes donde se colocan la materia prima (Desrosier, 1988).

Por las características de esta fruta, al efectuar la deshidratación, presenta un cambio de textura y color (oscurecimiento) debido a la oxidación enzimática provocada por la *bromelina*, que es la causante del empardeamiento de la muestra.

- Papaya : Esta fruta es la que tiene el mayor contenido de H<sub>2</sub>O (90.7%) de todos los materiales pre-seleccionados (Van Arsdell, 1973), provocando con ello que sin necesidad de efectuar la operación de secado, esta se deshidrata fácilmente debido a que existe un gradiente alto de concentración entre el ambiente y la papaya.

Presenta también oscurecimiento, siendo la enzima encargada de la oxidación: *papaina*.

Basándose en todas estas observaciones, se seleccionó los materiales que fueron sometidos a secado, siendo estos:

- ◆ **Silica Gel.**
- ◆ **Cebolla.**
- ◆ **Cilantro.**

Con referente a los demás materiales, se recomienda que para futuras investigaciones se efectúe el secado a la yerba buena y al ajo, ya que por su contenido de humedad pueden ser sometidos al proceso y poder obtener las curvas de secado para posterior agroindustrialización; ya que en la preselección al secarse cebolla, ajo, cilantro y yerba buena estos mostraron buena apariencia por lo que al mezclarse dan origen a un condimento cuya apariencia es apetecible como ingrediente a cualquier platillo culinario.

Con lo anterior puede ser objeto de comercialización y contribuir al mantenimiento del equipo y de los laboratorios de Ingeniería Química.

En el caso de la papaya y la piña por las reacciones enzimáticas que se dan, se recomienda utilizar secadores más complejos, es decir donde se efectúe vacío, ya que con ello se asegura la preservación de los valores nutritivos de estos.

### 3.3. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES SOMETIDOS A SECADO.

#### 3.3.1. SILICA GEL.

Es un absorbente regenerativo formada por una red cristalina, continua tridimensional de partículas esféricas de silica coloidal. No es tóxica ni combustible (Gessner, 1981)

##### Usos:

- a) Como agente deshumidificante y deshidratante en aire acondicionado.
- b) Secado de aire comprimido y otros gases, líquidos, tales como refrigerantes y aceites conteniendo agua en suspensión.
- c) En la conversión (recuperación) de gasolina natural proveniente del gas natural.
- d) Decoloración de aceites de petróleo.
- e) Cromatografía.
- f) Agente anticompactante en cosméticos y medicamentos.

##### Origen :

Las geles de silica pueden ser preparadas por diversos métodos, la mas común es la reacción del silicato sódico con ácido sulfúrico en un PH menor de 10 (Gessner, 1981)

Las geles de silica son clasificadas en 3 tipos:

- Gel de densidad regular. (utilizado en laboratorio, cuyo grado es calidad reactivo)
- Gel de densidad intermedia. (es el más comercializado, existen grados reactivo e industrial.)
- Gel de densidad baja

El polvo de silica puede ser hecho por macerado o geles secas micronizadas, la cual disminuye el tamaño de los fragmentos de la gel última inalterada. Los Geles y polvos se caracterizan por la densidad, tamaño, forma de las partículas, distribución de las partículas y por la potencia de agregación o coalecencia.

Cuando la sílica es usada como absorbente, la estructura del poro determina la capacidad de absorción de la gel. Los poros son caracterizados por:

- Área de la superficie específica.
- Volumen del poro específico (volumen total de poros/ gr de sólidos).
- Diámetro promedio del sólido.
- Distribución del tamaño del poro
- Grado al cual los poros más largos está restringido por poros pequeños.

Las superficies pueden ser categorizadas como hidroxiladas completamente en las cuales la superficie consiste exclusivamente de grupos de silanol (Si-O-H), tales como grupos en un siloxano (Si-O-Si) o como una superficie orgánica.

Debido a los tipos de sílica gel, cuando es usada como absorbente, los grados comerciales son capaces de soportar temperaturas superiores a los 260-315°C y para grados reactivos (laboratorio y cromatografía) soportan temperaturas hasta de 90°C sin perder la capacidad de absorción (Gessner, 1981).

Los grados comerciales son provistos con las medidas presentadas en cuadro 3.1 y en cuadro 3.2 se muestran algunas propiedades físicas de la sílica gel seca.

**Cuadro 3.1.** Tamaños de partícula de la sílica gel comercial (Gessner, 1981)

No Malla (mesh)	Abertura (mm)
3-8	6.68 - 4.699
6-16	3.327 - 0.991
14-20	1.168 - 0.833
14-42	1.168 - 0.351
28-200	0.586 - 0.074
325 exacto	-----

**Cuadro 3.2** Propiedades físicas de la silica gel seca. (Gessner, 1981).

Propiedades	Silica Gel
% SiO <sub>2</sub>	96.5 ~99.6
% CaO	-----
% NaO	0 ~ 1
Tamaño de poro	1 ~ 100 nm (10 <sup>-7</sup> ~ 10 <sup>-5</sup> cm)
Area superficial	200 – 700 m <sup>2</sup> /gr
PH solución acuosa	2.3 ~ 7.4
ρ <sub>BULK</sub> (aparente)	0.1 ~ 0.8 gr/cm <sup>3</sup>
ρ VERDADERA	2.22 gr/cm <sup>3</sup>
Índice de refracción	1.35 – 1.45
T° máxima de absorción (grado reactivo)	85 ~ 90°C
T° máxima de absorción (grado comercial)	260-315°C
Absorción en aceite	0.9 ~ 3.15 gr/gr

### 3.3.2. CEBOLLA. (*Allium Cepa* L.)

La cebolla constituye junto al ajo las especies más importantes de la familia botánica: *Amarillydaceae*. La cebolla cuyo nombre científico es *Allium Cepa* L, son plantas provistas de un sistema radicular bastante superficial y fibroso (Quiñones, 1995).

Sus bulbos son el resultado del ensanchamiento y acumulación de reservas en la base de la hojas, inmediatamente encima de un corto tallo subterráneo (Fusagri, 1975).



Origen :

Según Quiñones (1995), afirma que la cebolla pertenece a la familia de las *Amarillydaceaes* y es originaria de Asia menor.

Descripción Botánica :

Hierba con bulbos de color rojo y/o blanco y olor fuerte característico. Sus hojas básales son largas generalmente lineales, cultivado generalmente en los volcanes. (Montaldo, 1981).

Usos :

- Utilizado en cocina culinaria.
- Terapéutico (uso popular): contra el mal de orín. Por ser un diurético, inhibe el *Bacillus Subtilis* y considerado también como hipoglucemiante ensayado en animales a los que se les provocó diabetes artificial. (Quiñones, 1995)

Clasificación Botánica :

Taxonómicamente la cebolla se clasifica de la siguiente manera (Fusagri, 1975):

- Reino : vegetal.
- División: Embriophyta.
- Subdivisión: Angiosperma.
- Orden: Liliiflores.
- Familia: Liliaceae (*Amarillydaceae*)
- Subfamilia: Alioideae.

Análisis Fitoquímico preliminar:

La planta completa de la cebolla contiene: aceites esenciales, alcaloides, flavonoides, glicósidos cardiotónicos y taninos (Quiñones, 1975).

La cebolla para su cultivo prefiere climas frescos especialmente en las fases iniciales de su desarrollo y durante la bulbificación; requiere de temperatura más alta durante la

maduración. Las temperaturas óptimas para alcanzar un buen estado de desarrollo oscila entre 10 ~26°C. Para almacenar la cebolla el ambiente adecuado debe oscilar entre 1 ~ 4°C, a una humedad relativa 70 ~75% y evitar las enfermedades más comunes entre ellos, el ataque de hongos como: *Aspergillus* y *Penicillium* (Montaldo, 1981).

En el cuadro 3.3 se muestran algunas características físicas y químicas de la cebolla, nótese que el contenido de agua es de 88.1%, lo cual es sujeto a ser sometido a secado; tomando en cuenta la temperatura de carbonización y la máxima permisible para el secado es 10 y 60°C respectivamente. Todos los datos presentados en el cuadro 3.3 están basadas en 100 gr. de porción comestible (INCAP, 1951).

**Cuadro 3.3.** Propiedades químicas y físicas de la cebolla. (INCAP, 1951)

Composición Química*	mgr
Valor energético (cal/gr.)	0.45
% H <sub>2</sub> O	88.1
Proteína	1.4
Grasa	0.2
Hidratos C (almidón, dextrona, azúcares)	9.7
Fibra	0.8
Ceniza	0.6
P	40
Ca	30
Fe	1
Vitamina A	5
Tiamina	0.04
Riboflavina	0.03
Niacina	0.3
Acido Ascorbico	10
Porción no comestibles	9
Temperatura de carbonización*	101°C
Temperatura de perdida de valor nutritivo* (P= 1 atm)	80°C
Temperatura máxima permisible para secado* (P= 1 atm)	60°C

\* Tomado de Van Ardell, 1973. "Food Deshidration". 2º Ed. Vol I

### 3.3.3. CILANTRO (*Coriandrum Sativum*).

El cilantro es utilizado comúnmente como ingrediente culinario. El nombre científico es *Coriandrum Sativum* L, generalmente es cultivado en la zona central de El Salvador. Su nombre común tiene muchas derivaciones, dependiendo de la zona y se le conoce a veces como: culantro y coriandro (Tiscorna, 1975).

#### Descripción Botánica :

Es una planta pequeña, anual, erguida, de tallo delgado, glabra, ramificada en la parte superior. Las hojas inferiores son largas y precioladas, pinadas con hojuelas sésiles, oreadas a sub-orbiculares, hondamente lobuladas de margen crenífero.

El tamaño de la hierba de tallo derecho es de aproximadamente 50 cm de altura. Su fruto mide cerca de 4 mm de largo. Las semillas son las únicas que se emplean en medicina (Reyes, 1980). Despide un olor aromático y tiene sabor agradable y característico producido por los aceites esenciales.

#### Usos :

- Como ingrediente culinario.
- Preparaciones farmacéuticas.
- Preparaciones en bebidas alcohólicas.
- Sus frutos masticados e ingeridos o en forma de infusión tonifican el tracto gastrointestinal y evitan la flatulencia.

#### Análisis Fitoquímico:

La planta completa del cilantro contiene: aceites esenciales, flavonoides, glicosidos cardiotónicos, triterpenos.

En el cuadro 3.4 presenta las características físicas y químicas del cilantro. Puede observarse que la composición del agua es alta (86%) por lo que también es sujeto de



deshidratación para uso agroindustrial. El cuadro 3.4 también está basado en 100 grs de porción comestible.

**Cuadro 3.4.** Propiedades físicas y químicas del cilantro (INCAP, 1951)

Composición Química*	mgr
Valor energético (cal/gr.)	42
% H <sub>2</sub> O	86
Proteína	3.3
Grasa	0.7
Hidratos C (almidón, dextrona, azúcares)	8.0
Fibra	1.7
Ceniza	2.0
P	72
Ca	188
Fe	3.0
Vitamina A	1600
Tiamina	0.15
Riboflavina	0.28
Niacina	1.6
Acido Ascórbico	75
Porción no comestibles	12
Temperatura de carbonización*	82°C
Temperatura de pérdida de valor nutritivo* (P= 1 atm)	53°C
Temperatura máxima permisible para secado* (P= 1 atm)	48°C

Tomado de Van Ardell, 1973. "Food Deshidration". 2° Ed. Vol I

## 4.0 DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO AL NIVEL DE LABORATORIO.

### 4.1. GENERALIDADES.

El equipo construido es un sistema capaz de secar muestras de materiales al nivel de laboratorio utilizando principios de transferencia de calor y masa.

En la sección 2.0 se mencionó que la separación de agua de los materiales húmedos, requiere energía calorífica para lograr la humedad final deseada del producto. El hecho de que los alimentos poseen una temperatura a la cual estos se descomponen, tal como la cebolla (60 °C) y cilantro (48 °C) a la presión atmosférica, nos restringe el uso de altas temperaturas, pero además para materiales inorgánicos, en particular la silica gel que su temperatura máxima permisible oscila entre los 85-90°C.

Es por ello que el equipo diseñado y construido al nivel de laboratorio tendrá en consideración todo este intervalo de temperatura.

El sistema diseñado y construido consta de resistencias eléctricas como fuente de calor, colocadas transversalmente al flujo de aire y las cuales están controladas por termostatos a manera de regular el flujo de calor, a fin de mantener una velocidad de flujo uniforme de aire, el sistema está provisto de un mecanismo de ventilación conformado por un ventilador de aspas axiales, accionado por un motor eléctrico. Este flujo de aire viaja en el interior de la carcasa del equipo.

Para cuantificar la pérdida de peso de los materiales húmedos se utilizan dos balanzas granatarias, en las cuales están en suspensión las bandejas que contienen los materiales a secar.

La medición de la temperatura del aire pasando en flujo paralelo a través de las bandejas que contienen el material húmedo, se realiza por medio de cuatro termómetros, obteniendo las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco del aire.

Al final del proceso de secado, la determinación del peso del sólido seco, se realiza introduciendo la bandeja con el material en la estufa modelo *precisión 18* de la planta piloto, hasta alcanzar un peso constante.

Un diagrama esquematizado del Secador al nivel de laboratorio se ilustra en la siguiente figura 4.1, donde se detallan las partes que lo conforman.

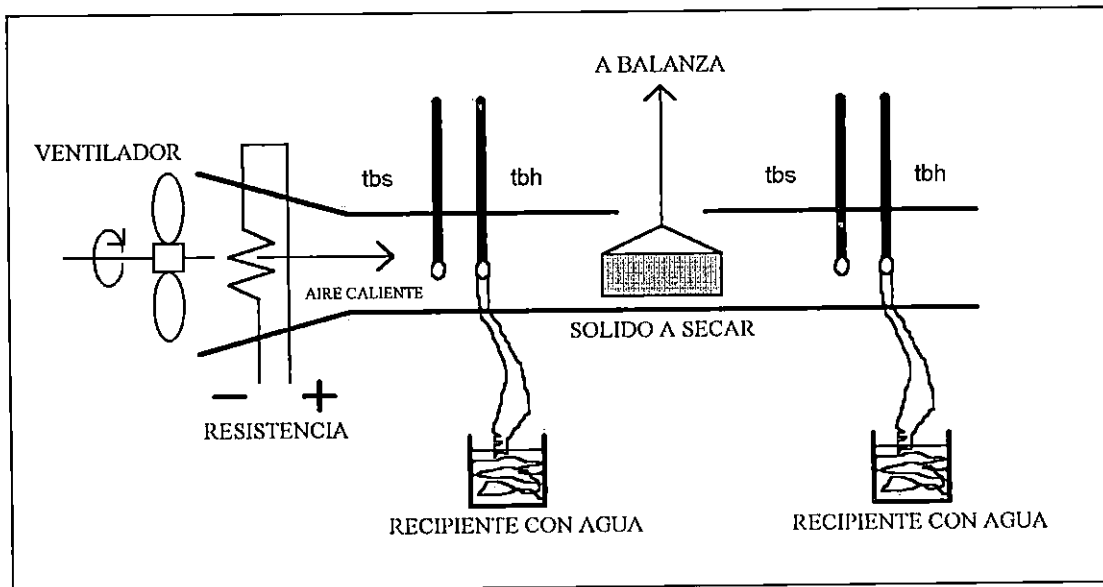


Fig. 4.1. Diagrama del secador al nivel de laboratorio

A continuación se describen los aspectos ingenieriles de construcción y funcionamiento del equipo.

#### 4.2. SISTEMA DE SOPORTE Y CARCAZA.

La carcaza del equipo consiste en una tubería cuadrada de 1.5 m de largo por 0.335 m de lado. El material utilizado por la construcción es lámina de hierro negra de 1/8 de pulgada de espesor, revestida con una capa de anticorrosivo, evitando así el deterioro provocado por la humedad. El ensamble de las láminas fue realizado por medio de soldadura eléctrica, con electrodos MT-12.

Para mantener la forma del equipo, la lámina de hierro está montada sobre un marco de ángulo de hierro de 1 ¼ pulgadas de lado por 1/8 pulgada de espesor en sus extremos y a lo largo de todas sus esquinas.

Además consta de un gabinete lateral móvil, el cual permite la fácil introducción de las bandejas con el material húmedo, las cuales como se mencionó con anterioridad están suspendidas en las balanzas. También esta compuerta facilita la limpieza y el mantenimiento del equipo (resistencias eléctricas, ventilador, etc.), la fácil abertura de esta compuerta se logra por medio de bisagras colocadas en la parte inferior de la carcaza, la cual puede ser desmontada en su totalidad del equipo, como se puede observar en la figura 4.2.

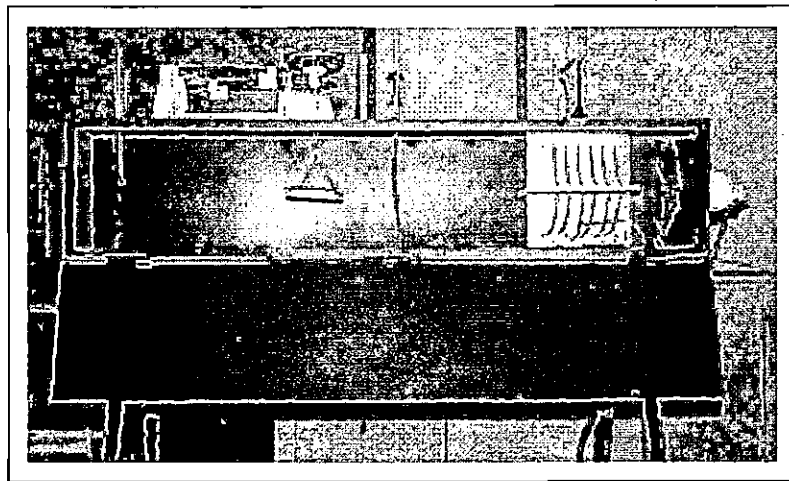


Fig. 4.2. Vista lateral del secador mostrando el gabinete lateral móvil.

El sistema de soporte del secador, está formado por tubos de hierro de 2.5 plg. de diámetro, y reforzados con ángulo de hierro para mantenerlo estable, proporcionando una altura del suelo a la parte inferior de la carcaza de 93.5 cm.

En las figuras I.4 hasta I.6 del anexo IV se detalla el diseño de Ingeniería que se uso para su construcción, mostrando un isométrico del equipo, una vista de planta y vista lateral.



### 4.3. SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DE LA VELOCIDAD DE FLUJO DE AIRE.

El sistema que proporciona el flujo de aire consta de un ventilador de aspas axiales, accionadas por un motor eléctrico de 110 voltios, el cual maneja cuatro niveles de velocidad de flujo (I, II, III y IV), Lo anterior descrito se muestra en la Figura 4.3.



Fig. 4.3. Vista Frontal del secador mostrando el ventilador y su control.

El intervalo de velocidad del flujo de aire recomendado para el secado en bandejas es de 1 a 10 m/s. Para encontrar la velocidad de flujo de aire, se utilizaron dos métodos:

a) *Estimación de la velocidad por medio del rotámetro.*

Se utilizó un rotámetro que mide la caída de presión (kPa) y la velocidad de flujo de aire (m/s), proporcionado por la Escuela de Ingeniería Mecánica, el cual fue calibrado por el Instituto Técnico Centroamericano (ITCA).

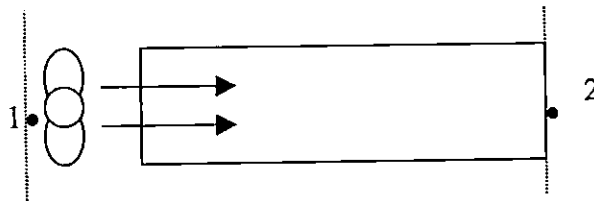
Los resultados obtenidos son los mostrados en el cuadro 4.1:

**Cuadro 4.1.** Velocidades de flujo de aire medidas por medio del rotámetro.

Nivel de velocidad	Velocidad (m/s)
I	5.92
II	6.74

b) *Calculo de la estimación del flujo de aire por medio del balance de energía mecánica*

Este calculo se logra planteando la ecuación de Bernoulli



**Fig. 4.4.** Diagrama del planteamiento de la ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{g}{gc} Z_1 + \frac{V_1^2}{2gc} + W_s = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{g}{gc} Z_2 + \frac{V_2^2}{2gc} + \Sigma H_f \quad (4.1)$$

En donde:

$P_1$  y  $P_2$ : Presión en el punto 1 y 2 respectivamente (atm)

$\rho_1$  y  $\rho_2$ : Densidad del aire en el punto 1 y 2 respectivamente ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_1$  y  $V_2$ : Velocidad del flujo de aire en el punto 1 y 2 respectivamente (m/s)

$Z_1$  y  $Z_2$ : Altura del punto 1 y 2 respectivamente (m)

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

$W_s$ : Trabajo dado al flujo de aire (J/kg)

$\Sigma H_f$ : Pérdidas

Consideraciones:

$$Z_1=Z_2, V_1=0$$

$$P_1=P_2, \Sigma H_f=0$$

Por lo tanto la ecuación nos queda:

$$W_s = \frac{V_2^2}{2gc} \quad (4.2)$$

La ecuación de la potencia al freno del motor eléctrico del ventilador es:

$$P_o = \frac{W_s \dot{m}}{\eta} \quad (4.3)$$

En donde:

$P_o$ : Potencia al freno (watt)

$\dot{m}$ : Flujo másico (kg/s)

$\eta$ : Eficiencia del motor

Sustituyendo la ecuación 4.2 en la 4.3:

$$P_o = \frac{\dot{m} V_2^2}{2gc\eta} \quad (4.4)$$

Para encontrar el flujo másico aplicamos la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = V_2 A \rho_{prom} \quad (4.5)$$

En donde:

$A$ : área de la sección transversal del secador (tubería cuadrada) :  $A=L^2$

$L$ : lado de la tubería cuadrada (m).

$\rho_{prom}$ : Densidad promedio del aire (kg/m<sup>3</sup>)

Para encontrar la densidad promedio aplicamos las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{prom} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad (4.6)$$

$$\rho_1 = \frac{P_1 M_B}{RT_1} \quad (4.7)$$

$$\rho_2 = \frac{P_2 M_B}{RT_2} \quad (4.8)$$

donde:

$M_B$ : Peso molecular promedio del aire (kg/mol)

R: constante de los gases ideales =  $82.057 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

La potencia al freno del motor eléctrico se calcula mediante la siguiente ecuación, para cada nivel de velocidad del motor eléctrico:

$$P_{O_I} = \nabla \cdot I_I \quad (4.9)$$

$$P_{O_{II}} = \nabla \cdot I_{II} \quad (4.10)$$

En donde:

$P_{O_I}$  y  $P_{O_{II}}$ : Potencia al freno por nivel de velocidad (watt)

$\nabla$ : Voltaje = 110 volt.

$I_I$  y  $I_{II}$ : Corriente consumida por nivel de velocidad (amperios)

Al sustituir en la ecuación 4.4 las ecuaciones 4.5 y 4.9 se encontró la velocidad de flujo en el plano dos para el primer nivel de velocidad (ecuación 4.11), de igual manera para el segundo nivel de velocidad se sustituye la ecuación 4.4 y 4.5 en la ecuación 4.10 (ecuación 4.12).

$$V_{2I} = \sqrt[3]{\frac{2I_I \nabla \eta}{A \rho_{prom}}} \quad (4.11)$$

$$V_{2II} = \sqrt[3]{\frac{2I_{II} \nabla \eta}{A \rho_{prom}}} \quad (4.12)$$

A continuación se presentan las tablas de datos (cuadro 4.2) y de los resultados generados (cuadro 4.3) a partir de las ecuaciones anteriores.

**Cuadro 4.2.** Datos para encontrar la estimación de la velocidad del flujo de aire

Variable	Valor	Unidades
$P_1$	1	(atm)
$P_2$	1	(atm)
$T_1$	25	(°C)
$T_2$	23	(°C)
$L$	0.335	(m)
$\nabla$	110	(volt)
$I_I$	0.30	(amp)
$I_{II}$	0.35	(amp)
$M_B$	29	Kg/mol
$R$	82.057e-3	(m <sup>3</sup> .atm)/(mol.K)

**Cuadro 4.3.** Resultados de la estimación de la velocidad del flujo del aire

Variable	Valor	Unidades
$\rho_1$	1.185	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_2$	1.193	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{prom}$	1.189	(kg/m <sup>3</sup> )
$A$	0.112	(m <sup>2</sup> )
$P_{O_I}$	33	(watt)
$P_{O_{II}}$	38.5	(watt)
$V_{2I}$	6.28	(m/s)
$V_{2II}$	6.61	(m/s)

En el siguiente cuadro se presenta una comparación de la velocidad del flujo de aire medida por medio del rotámetro y la calculada por medio del balance de energía mecánica.

**Cuadro 4.4.** Comparación de la velocidad medida por el rotámetro y la ecuación de Bernoulli.

Nivel de velocidad	Velocidad por rotámetro (m/s)	Velocidad por Bernoulli (m/s)	Discrepancia (%)
<b>I</b>	<b>5.92</b>	<b>6.28</b>	<b>6.08</b>
<b>II</b>	<b>6.74</b>	<b>6.61</b>	<b>1.92</b>

#### 4.4. SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DE CALOR.

El sistema de calentamiento consta de seis resistencias de 1000 watt de potencia, trabajando a un voltaje de 110 voltios. La intensidad calorífica se controla por medio de tres termostatos, por lo que cada termostato controla dos resistencias, colocadas en forma paralela, como se describe en el diagrama eléctrico de la figura 4.5.

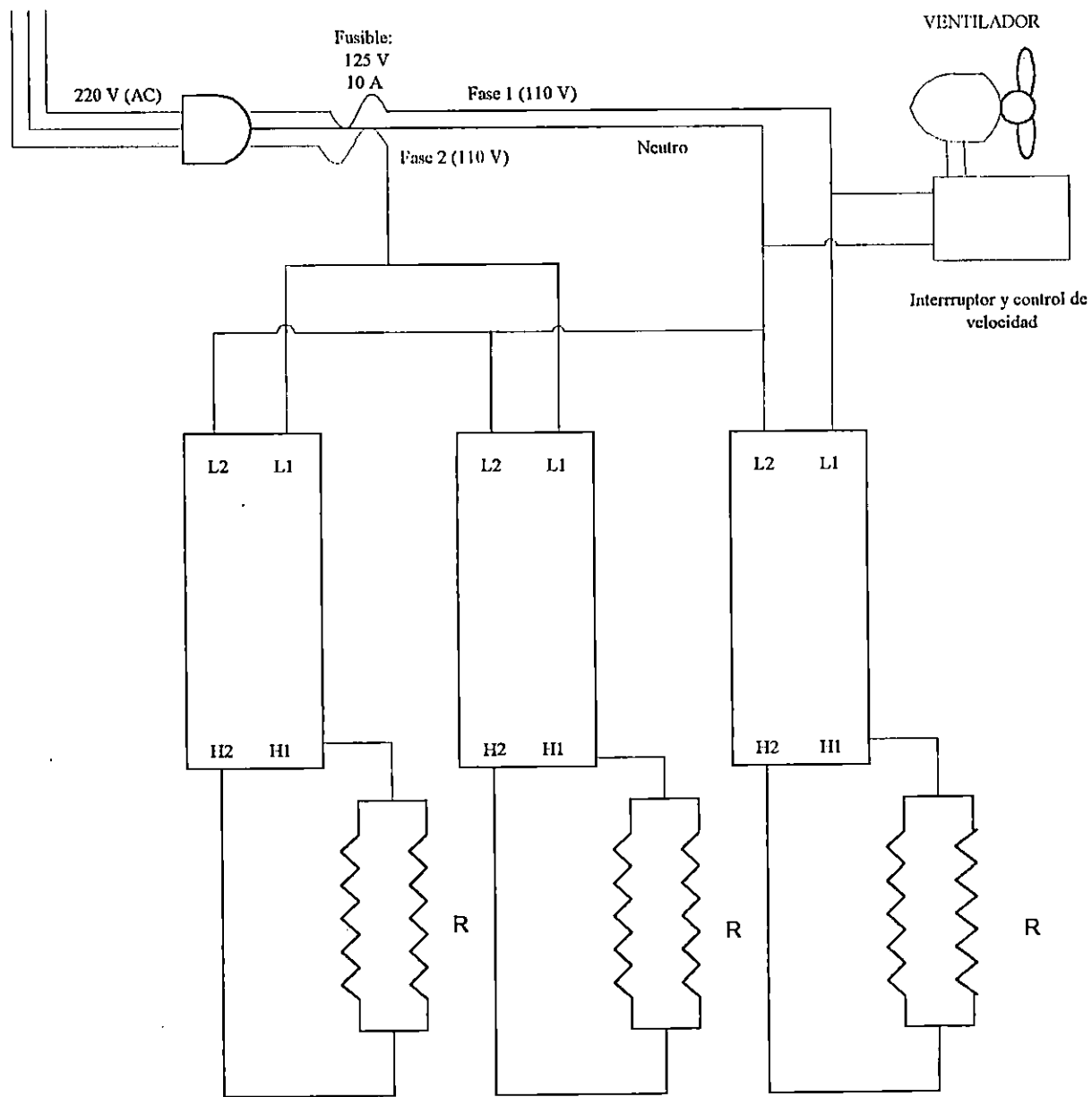
Las resistencias están montadas en un material aislante (lámina de asbesto) de 1.5 cm de espesor, en forma de cruceta, la cual evita el contacto directo entre la carcaza y las resistencias, evitando un corto circuito del sistema de calentamiento, como se muestra en la figura 4.6.

Se seleccionó la lámina de asbesto, debido a que según las especificaciones técnicas de la resistencia, esta puede llegar a la temperatura máxima en la superficie del alambre de 870 °C, este dato fue tomado del código de colores para la estimación de la temperatura del acero (García y Ramírez, 1994).

Siendo el asbesto un material aislante resistente a altas temperaturas (1375 K). La cruceta está formada por dos láminas entrelazadas, cuyas dimensiones son de 0.33 m de ancho por 0.33m de alto.

##### 4.4.1. ESPECIFICACIONES DE LAS RESISTENCIAS.

Como ya se menciono; el sistema de calentamiento está formado por seis resistencias eléctricas. Durante la operación del equipo se realizaron mediciones de amperaje de los termostatos, así se obtuvieron los datos medidos con un voltamperímetro de gancho, en los diferentes niveles de intensidad de calor regulado por los termostatos, el voltaje es un valor constante de 110 v (ver cuadro 4.5).



$R = 1000 \text{ w}$

Fig. 4.5. Diagrama eléctrico del secador al nivel de laboratorio.



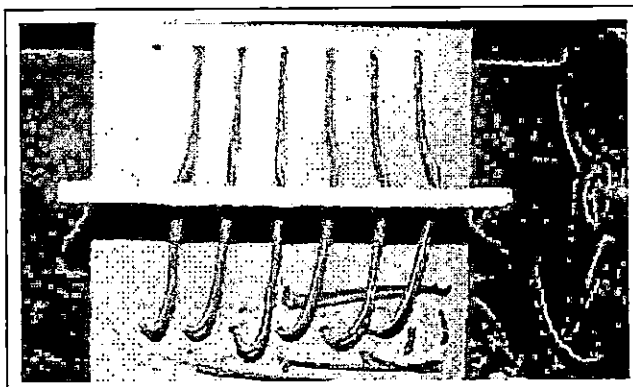


Fig. 4.6. Fotografía de la distribución de las resistencias en la cruceta de asbesto.

Cuadro 4.5. Lecturas de corriente por medio de voltamperímetro de los termostatos

Nivel de Termostato	Amperaje por par de resistencias (A)	Amperaje por Resistencia (A)
Lo	20.4	10.2
2	20.2	10.1
4	20.1	10.05
6	19.7	9.85
Hi	18.2	9.1

La siguiente ecuación nos da la cantidad que teóricamente, tendrían que consumir cada resistencia, sabiendo que la potencia de cada una es de 1000 watt y el voltaje es de 110 voltios, por tanto el valor teórico de la corriente según las especificaciones de las resistencias es:

$$I = \frac{P_R}{V} \quad (4.13)$$

$$I = \frac{1000\text{watt}}{110\text{volt}} = 9.091 \text{ amp.}$$

En donde:

$P_R$ : Potencia de la resistencia (watt)

I: Intensidad de corriente (amperios)

V: Voltaje (voltios)

Comparando el anterior valor con el medido en el nivel máximo de operación del termostato, se observa que la diferencia no es significativa.

Al analizar la tabla anterior, los datos a simple vista parecen ser incongruentes, debido a que a menor intensidad de calor mayor consumo de corriente. Pero, esto se debe a que los termostatos en los niveles de intensidad de calor bajos el desplazamiento de la corriente es intermitente, por lo que el tiempo de residencia es bajo, de lo contrario en las intensidades altas, observando que en el nivel máximo de intensidad de calor el desplazamiento de la corriente es constante.

#### 4.5. SISTEMA DE MEDICION DE TEMPERATURA.

Para la medición de la temperatura del aire por el paso de las bandejas, se utilizaron cuatro termómetros distribuidos en dos pares, antes y después de las bandejas, obteniéndose las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco respectivamente, como se muestra en la figura 4.7.

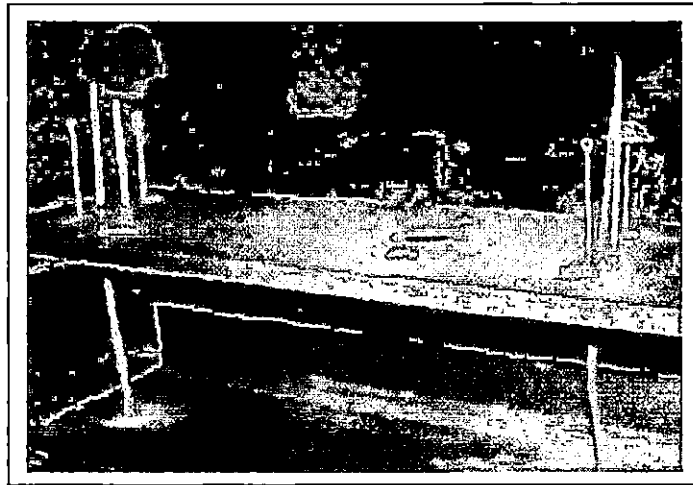


Fig. 4.7. Fotografía de distribución de los termostatos.

Los cuatro termómetros utilizados oscilan en el rango de  $-20$  a  $110$  °C, con una precisión de  $1$  °C, construidos con vidrio pyrex, marca CENCO y como fluido manométrico: mercurio.

Para la medición de la temperatura de bulbo húmedo, se simuló condiciones de saturación con el bulbo del termómetro, esto se logró colocando un cedazo, el cual permanecía continuamente húmedo, por medio de un recipiente con agua. Esto se logra por medio del efecto de difusión del líquido dentro del cedazo.

Los termómetros están sostenidos en la parte superior de la carcaza, los cuales se mantienen fijos por medio de un empaque de hule.

#### 4.6. SISTEMA DE MEDICION DE PESO Y TIEMPO.

Para la medición de la pérdida de peso de los materiales sometidos a secado, se logra por medio de dos balanzas tipo granatarias, marca OHAUS, con una precisión de 0.1 gramo y cuyo rango de peso oscila entre 0 y 2,610 gramos.

Las balanzas están colocadas externamente sobre la parte superior de la carcaza, alineadas en forma paralela, lo cual permite obtener réplicas de las mediciones efectuadas, como lo muestra la figura 4.8.

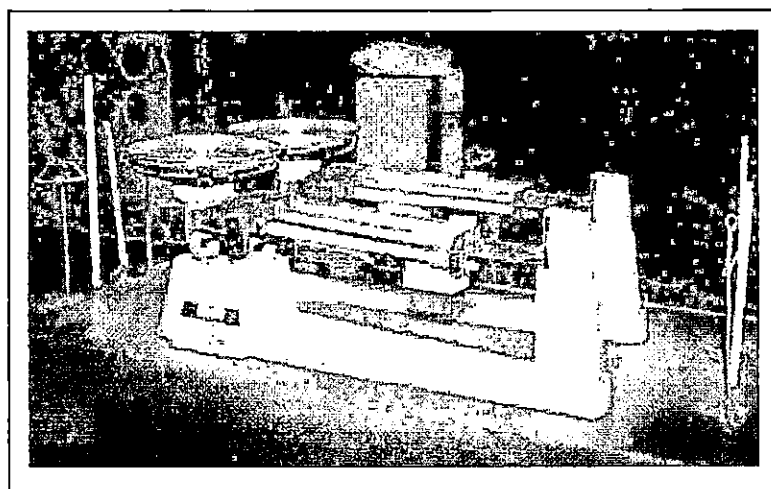


Fig. 4.8. Disposición de las balanzas.

Sobre la cubierta de la carcaza se perforaron dos agujeros de 2.5 cm de diámetro, lo que nos permitió la colocación de las bandejas en el interior de la carcaza. La disposición de las bandejas en el seno del equipo fue medida minuciosamente, a modo de que estas estuvieran distribuidas en el centro de la tubería, logrando con ello que el flujo de aire se distribuya uniformemente en la superficie expuesta al secado.

Las bandejas utilizadas son de lámina galvanizada, de espesor de 3/64 de pulgada. Se trabajo con cuatro espesores de bandejas (este es el espesor de lecho utilizado), los cuales

fueron de 1.0, 1.5, 2.0, y 3.0 cm de espesor. Cuyas dimensiones son presentadas en la cuadro 4.6.

Para evitar la vibración excesiva de las bandejas, debido al flujo de aire al momento de medir el peso del material, se sujetaron las bandejas por medio de alambre telefónico de cobre N° 28, el cual tiene como función lograr la unión de la balanza con la bandeja suspendida y así contrarrestar el movimiento vibratorio debido al flujo de aire, consiguiéndose lecturas más veraces.

Para determinar el tiempo instantáneo de secado, se utilizó un cronómetro analógico de precisión de 0.2 segundos, marca HEUER.

**Cuadro. 4.6. Dimensiones de las bandejas.**

Altura (cm)	Largo (cm)	Ancho (cm)
1.0	12.0	9.5
	12.0	9.5
1.5	12.3	9.0
	12.3	9.0
2.0	12.3	9.0
	12.3	9.0
3.0	12.2	7.0
	12.0	7.5

## 5.0 METODOLOGIA DE LA EXPERIMENTACION.

### 5.1 DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL.

Una vez diseñado y construido el sistema de secado al nivel de laboratorio, se procede a la etapa experimental que involucra una serie de procedimientos que se especificaran a continuación:

#### 5.1.1 RECOLECCION DE LAS MUESTRAS.

La materia prima a seleccionar durante el desarrollo del experimento, tal como se describe en la sección 3.2, será la silica gel, cebolla y cilantro; siendo proporcionada por la planta piloto para el caso de silica (gel densidad intermedia, calidad reactivo) y para la cebolla y cilantro, adquiridas al azar en los mercados municipales de ayutuxtepeque y mejicanos.

#### 5.1.2 PREPARACION DE LAS MUESTRAS.

Para efectos de un mejor resultado en cuanto a la obtención de parámetros que lleven al diseño del secador al nivel piloto, se procedió de la siguiente manera:

Silica gel: inicialmente se tomó la muestra total recolectada (1 kg) la cual fue sometida a lavado y posteriormente se determinó el tamaño de partícula, esto se efectuó pasando la muestra en un tamiz convencional de la serie Tyler de malla 10 cuya abertura (diámetro de la partícula) es de 1.654 mm. El tamaño del grano fue seleccionado de acuerdo a las medidas comerciales dadas en el cuadro 3.1 de la sección 3.3.

Cebolla y Cilantro: al igual que la silica gel, fue sometida a lavado y posteriormente a una reducción de tamaño (cortado manual).

Una vez sometidas las muestras al proceso anterior, están listas para que de una forma aleatoria sean tomadas las porciones de materia prima para la obtención de humedades de equilibrio y luego ser introducidos en el sistema de secado al nivel de laboratorio en cada lote que se procese.

### 5.1.3 OBTENCION DE CURVAS DE HUMEDADES DE EQUILIBRIO (X\*)

Antes de someter los materiales al proceso de secado, es necesario obtener las humedades de equilibrio en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire, ya que indican los porcentajes límites en los cuales el aire no seca ni humedece el sólido.

Para la determinación de la humedad de equilibrio se hizo uso de la cámara de humedad relativa del Centro para el Desarrollo de la Industria del Empaque y Embalaje (CDIECAP). Este equipo simula condiciones ambientales, los rangos de operación oscilan entre temperaturas de  $-30^{\circ}\text{C}$  hasta  $70^{\circ}\text{C}$  y humedades relativas de  $0 \sim 90\%$ . El equipo utilizado se muestra en la figura 5.1

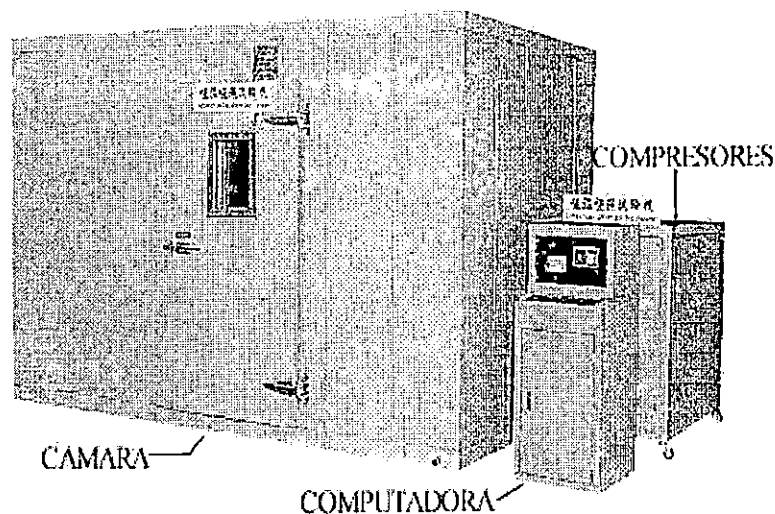


Fig 5.1. Cámara de Humedad Relativa utilizada en la determinación de humedades de equilibrio.

Se construyeron 6 bandejas de 6 cm de largo x 3 cm de ancho, siendo el material aluminio cuyo espesor es de 0.27 mm. En ellas se depositan las muestras que serán introducidas a la cámara de humedad relativa.

Las temperaturas máximas permisibles de secado de los materiales tal se reportan en la sección 3.3, no debe ser mayor de 85 ~ 90°C para la silica gel, la cebolla y cilantro no mayor de 60 y 48°C respectivamente. Esto nos restringe de igual manera la obtención de humedades de equilibrio, seleccionando de esta manera los niveles de temperatura y humedad relativa adecuados para cada uno de los materiales. Así, se seleccionó las condiciones de operación para los 3 materiales, siendo estos: 4 niveles de temperatura (25, 30, 40 y 50°C) y 5 niveles de humedad relativa (40, 50, 60, 70 y 80%).

En el caso de la silica gel por ser higroscópico e inorgánico las variaciones de humedad pueden ser obtenidas sin dificultad alguna, hasta obtener el peso constante de la muestra (equilibrio). El tiempo ( $\theta$ ) aproximado de estabilización para obtener el peso constante fue de 5 hrs.

Para los materiales orgánicos fue difícil obtener los valores de equilibrio, tal es el caso de la cebolla que tiende a descomponerse a medida que alcanza las condiciones de equilibrio (tiempo aproximado 10 hrs). Por ello, se trabajó con una temperatura = 25°C y los 5 niveles de humedad relativa antes mencionados.

En el cilantro no fue posible obtener los valores de equilibrio debido al desprendimiento de aceites orgánicos depositados en el recipiente lo cual hacen variar el peso de la muestra y no poder llegar al peso constante. El tiempo de residencia de la muestra dentro de la cámara no era menor de 26 hrs, existiendo siempre la fluctuación en el peso.

Es necesario dejar en claro en este momento que para la determinación de la humedad de equilibrio de los 3 materiales, se trató con el equipo existente en CDIECAP y no procediendo con los métodos estáticos sencillos recomendados consistentes en colocar varias muestras en desecadores de laboratorio ordinarios que contengan soluciones de



H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de concentraciones conocidas que reproduzcan atmósferas de humedades relativas conocidas, lo cual incidió en los problemas presentados con la cebolla y el cilantro respectivamente.

A continuación se presenta la marcha para la obtención de humedades de equilibrio de los materiales sometidos:

a) *Material y Equipo:*

- Balanza semi - analítica.
- Cámara de humedad relativa.

b) *Procedimiento:*

- Pesarse las bandejas individualmente (w<sub>o</sub>).
- Colocar el material a obtener la humedad de equilibrio en las bandejas.
- Configurar la cámara de humedad relativa a la temperatura y % HR deseadas. Este equipo es manejado por el personal encargado del CDIECAP.
- Después de una hora, pesarse constantemente el material hasta que no exista variación en el peso. Se recomienda intervalos de 30 minutos en las mediciones. Anotar el peso constante (w<sub>f</sub>).
- Obtenido el peso constante, introducir la muestra en la estufa y llevarlo hasta sequedad total.
- Pesarse la muestra seca (w<sub>s</sub>).
- Calcular la humedad de equilibrio (X<sup>\*</sup>)

$$X^* = \frac{(w_f - w_s)}{(w_s - w_o)} \quad \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de sólido seco}} \quad (5.1)$$

Aproximadamente el tiempo para obtener el peso del sólido seco para la silica es de 30 min. a una temperatura de 70°C y la cebolla 45 min a 55°C

Una vez ejecutado el procedimiento anterior, los cuadros 5.1 y 5.2 muestran las humedades de equilibrio obtenidas para la silica gel y la cebolla, los cuales son representados en el gráfico de la figura 5.2. y 5.3.

**Cuadro 5.1** Datos obtenidos del contenido de humedad de equilibrio para la silica gel.

% HR	T = 25°C	T = 30°C	T = 40°C	T = 50°C
	X* (gr H <sub>2</sub> O/gr SS)	X* (gr H <sub>2</sub> O/gr SS)	X* (gr H <sub>2</sub> O/gr SS)	X* (gr H <sub>2</sub> O/gr SS)
40	0.1029	0.1356	0.065	0.055
50	0.1254	0.1636	0.08	0.065
60	0.1412	0.1810	0.105	-----
70	0.2324	0.2601	0.1405	0.955
80	-----	-----	0.202	0.132

**Cuadro 5.2** Datos obtenidos del contenido de humedad de equilibrio para la cebolla.

T = 25°C	
% HR	X* (gr H <sub>2</sub> O/gr SS)
52	0.09
61	0.1105
70	0.155
80	0.355

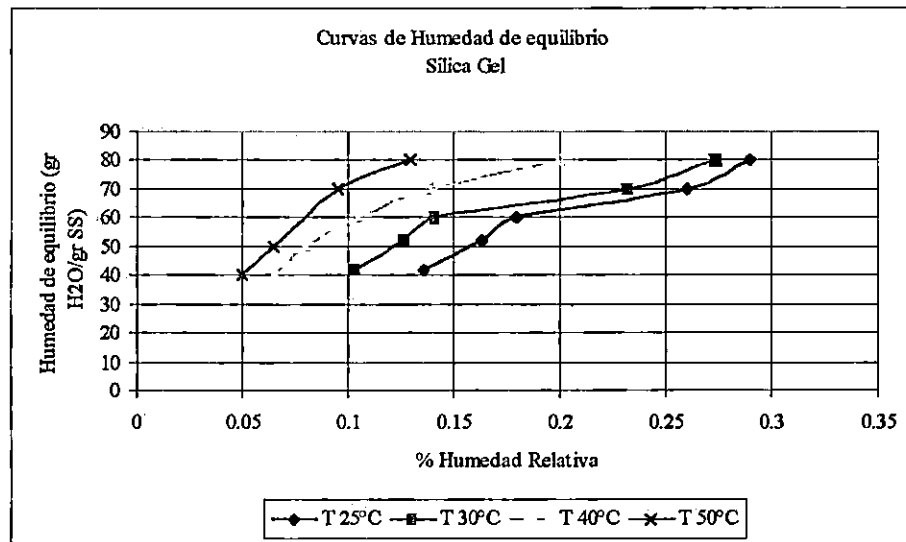


Fig. 5.2. Contenido de Humedad de equilibrio a diferentes temperaturas para la silica gel.

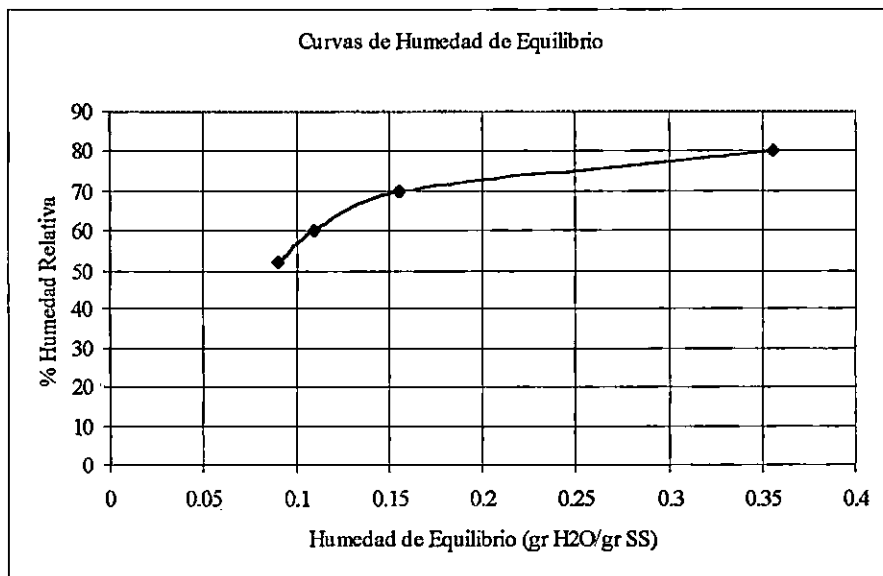


Fig. 5.3. Contenido de Humedad de equilibrio a 25°C para la cebolla.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que el valor de las humedades de equilibrio disminuyen al aumentar la temperatura a un porcentaje de humedad relativa constante, expuesto también de manera teórica en la sección 2.2. En los diagramas de equilibrio de la sílica gel se puede extrapolar las gráficas hasta el origen, debido a que este material por ser poroso e inorgánico el contenido de humedad es cero cuando el % HR=0.

#### 5.1.4 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL SECADOR PILOTO.

En toda experimentación existen variables dependientes e independientes, cuya combinación se considera como determinante en la consecución de la máxima cantidad de información sobre la obtención de parámetros que conlleven al diseño del secador piloto.

La experimentación no requiere de un diseño experimental, ya que se conocen las variables involucradas en el proceso, por lo que se realizará un modelado empírico que reproduzcan matemáticamente el fenómeno de secado.

La etapa de experimentación puede resumirse en los siguientes pasos:

- a) Listar todas las variables influyentes sobre el proceso.
- b) Determinar las variables controladas por el experimentador (variables independientes) y las no controlables.
- c) Definir las variables dependientes.
- d) Una vez realizado el experimento, realizar el modelado empírico que reproduzca matemáticamente cada corrida del lote de secado al nivel de laboratorio.
- e) Realizar el escalamiento al nivel piloto.

#### *5.1.4.1 Identificación de variables involucradas en el proceso.*

Las variables involucradas en el proceso se resumen básicamente en el siguiente listado:

- Naturaleza del material sometido a secado.
- Pérdida de peso de la muestra.
- Tiempo de secado.
- La temperatura de secado.
- Condiciones ambientales (temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo, % humedad relativa, etc.)
- Velocidad del medio secante (aire).
- Espesor del material a secar.
- Humedad inicial del sólido.
- Humedad crítica del sólido.
- Humedad final del sólido.

Muchas de las variables que se utilizarán para la obtención de parámetros de secado, serán en base a los espesores de bandejas seleccionados, siendo la alturas de los lechos de 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0 cm, tal y como se describe en el cuadro 4.6. En consecuencia, estos espesores serán el parámetro básico para determinar las curvas de secado y la cantidad de materia prima a utilizar.

La naturaleza de los materiales sometidos a secado, está fijado básicamente por el contenido de agua presente en cada uno de los materiales, dadas en las características físicas y químicas presentadas en la sección 3.3.

La pérdida del peso de la muestra será una variable que no afectara al proceso, puesto que se controlará mediante una balanza granataria que en su extremo inferior se le colocará la bandeja suspendida con el material húmedo.

El tiempo instantáneo de secado será medido mediante un cronómetro analógico de precisión de 0.2 seg.

Las temperaturas de secado están regidas por las temperaturas máximas permisibles de secado de cada uno de los materiales, expresados en la sección 3.3. El control de esta, se hará mediante 2 pares de termómetros colocados antes y después de la bandeja. La medición de la temperatura de bulbo seco se obtendrá por lectura del termómetro inmerso en la corriente de aire y la de bulbo húmedo se realizará de la manera sencilla colocando un cedazo humedecido con agua, simulando en el bulbo aire saturado de agua.

Las condiciones ambientales será una variable no controlada, ya que dependerá de la época del año.

La velocidad del aire será una variable controlada por los 2 niveles de velocidad (5.92 y 6.74 m/s), proporcionados por un motor eléctrico que induce una corriente eléctrica en cada nivel de 0.3 y 0.35 amperios respectivamente.

El espesor de bandeja como se menciona anteriormente es el parámetro básico y se controla por medio de 4 bandejas de 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0 cm de altura.

Como resultado de esta depuración técnica o tamizado de variables, se determinan que únicamente serán 5 las variables a manejar durante la realización del proceso de secado al nivel de laboratorio. Estas variables a controlar son específicamente: *la pérdida de peso ( $W$ )*, *el tiempo de secado ( $\theta$ )*, *la temperatura de secado ( $T$ )*, *la velocidad del aire ( $v$ )* y *el espesor del material ( $H$ )*, los cuales variaran en un rango adecuado a fin de determinar las humedades que conlleven a la obtención de la velocidad de evaporación del agua que serán detalladas posteriormente.

#### 5.1.4.2 Mecanismo de la Experimentación.

Como se describió anteriormente, las variables a manejar en la experimentación son el tiempo de secado ( $\theta$ ), pérdida de peso del material ( $W$ ), la temperatura de secado ( $T$ ), la velocidad del aire ( $v$ ) y el espesor del lecho de la materia prima ( $H$ ). En este sentido la experimentación se basará en 4 variables independientes y una variable dependiente, que para este caso en particular será la humedad del sólido.

De acuerdo con lo anterior y tomando en cuenta la naturaleza de la materia prima de los 3 materiales, se seleccionaron los siguientes niveles;

Silica Gel: 4 niveles de temperatura, 4 niveles de espesor de lecho ( $H=1.0, 1.5, 2.0$  y  $3.0$  cm) y 2 niveles de velocidad ( $v_1 = 5.92$  y  $v_2 = 6.74$  m/s); tomando en cuenta que el nivel de temperatura no sobrepase los  $90^\circ\text{C}$  para evitar la degradación del grano.

Los niveles de temperatura variarán en un rango de  $10^\circ\text{C}$ , comenzando con  $40^\circ\text{C}$  como la temperatura menor, 5 grados arriba de la temperatura mínima de operación del secador al nivel de laboratorio y teniendo como límite superior de secado los  $70^\circ\text{C}$ .

El monitoreo del tiempo de secado, variara en un rango de 3 a 5 minutos, comenzando en cero horas y finalizando hasta que la variación de la pérdida de peso de la muestra no sea apreciable para cada uno de los niveles seleccionados. El rango de medición del tiempo se hará en 5 minutos cuando predomine el periodo de secado constante y en 3 minutos cuando se alcance el periodo decreciente.

Cebolla: tendrá 3 niveles de temperatura, 2 niveles de espesor ( $H= 1.0$  y  $1.5$  cm) y dos niveles de velocidad ( $v_1 = 5.92$  y  $v_2 = 6.74$  m/s); considerando que la temperatura máxima permisible para el secado a la presión atmosférica, no exceda los  $60^\circ\text{C}$ .

Los niveles de temperatura variarán en un rango de  $5^\circ\text{C}$ , comenzando con  $45^\circ\text{C}$  como temperatura mínima y  $55^\circ\text{C}$  como máxima. La medición del tiempo, se realizara en intervalos también de 3 a 5 minutos.

Cilantro: 2 niveles de temperatura, 2 niveles de espesor ( $H = 1.0$  y  $1.5$  cm) y 2 niveles de velocidad ( $v_1 = 5.92$  y  $v_2 = 6.74$  m/s). Al igual que la silica y la cebolla, tendrá en consideración la temperatura de secado no exceda los  $48^\circ\text{C}$  (temperatura máxima permisible).

Los niveles de temperatura variaran en un rango de  $5^\circ\text{C}$ , comenzando con  $45^\circ\text{C}$  y finalizando en  $50^\circ\text{C}$ . También la medición del tiempo de secado se realizara en intervalos de 3 a 5 minutos.

En el cuadro 5.3 se resumen los datos de operación de cada nivel seleccionado para cada uno de los materiales, descritos anteriormente.

**Cuadro 5.3.** Datos de operación para obtención de curvas de secado

Material	Temperatura (T)		Espesor (H)		Velocidad (v)		Monitoreo
	Nivel	Valor ( $^\circ\text{C}$ )	Nivel	Valor (cm)	Nivel	Valor (m/s)	
Silica gel	4	40	4	1.0	2	5.92	$X = f(\theta, T, H, v)$
		50		1.5			
		60		2.0			
		70		3.0			
Cebolla	3	45	2	1.0	2	5.92	
		50		1.5		6.74	
		55					
Cilantro	2	45	2	1.0	2	5.92	
		50		1.5		6.74	



Una vez seleccionados los niveles de temperatura, espesor y velocidad de flujo de aire deseados para cada material, se procede a obtener los parámetros de secado al nivel de laboratorio que servirán para el diseño del secador al nivel piloto:

a) *Material y Equipo.*

- Secador al nivel de laboratorio.
- Juego de bandejas de 4 espesores,  $H=1.0, 1.5, 2.0$  y  $3.0$  cm.
- Estufa.
- Cronometro.
- 1 balanza granatarea.
- 4 termómetros ( $0 - 100^{\circ}\text{C}$ )
- 2 beaker 250 ml.

b) *Procedimiento.*

1. Seleccionar el nivel de temperatura, velocidad y espesor de lecho de operación.
2. Limpiar las bandejas. Deben estar libres de cualquier material impregnado y completamente seco.
3. Pesar las bandejas individualmente ( $W_b$ ).
4. Para construir las gráficas de curvas de secado. Armar el equipo de secado al nivel de laboratorio. (ver figura 4.1 y 4.2). Se recomienda encender el ventilador y termostatos en este paso, con ello se asegura la estabilidad de operación del equipo Para seleccionar la temperatura requerida de secado, referirse a la sección 7.1.1 del manual de operación del secador al nivel de laboratorio.
5. Colocar el material a secar en la bandeja. El material debe estar al ras del espesor del plato. Con esto se asegura:
  - La relación de la superficie que se seca a la que no se seca sean iguales.
  - Area de transferencia de calor y transferencia de masa es idéntica.
6. Pesar el material húmedo con la bandeja ( $W_1$ ).
7. Colocar en suspensión la bandeja en la parte inferior de la balanza, como se muestra en la figura 4.2.

8. Una vez colocada la bandeja en el secador.  
Monitorear el tiempo ( $\theta$ ), la pérdida del peso ( $W$ ) y las temperaturas de bulbo seco (TBS) y húmedo (TBH) del medio secante.
9. Detener el proceso de secado cuando se alcancen las condiciones de equilibrio (es decir cuando no existan variaciones en la pérdida de peso).
10. Finalizado el proceso de secado, introducir la muestra en la estufa y determinar el peso del sólido seco ( $W_s$ ).

Todo este procedimiento se repite para las demás condiciones de temperatura, velocidad y espesor seleccionados.

## 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL.

Los resultados obtenidos del monitoreo de las variables involucradas en el proceso de secado, se presentan en el anexo V.

En ellas se muestran todas las corridas efectuadas para la silica gel y cebolla; en la presentación de los cuadros se tabula el tiempo ( $\theta$ ) vrs la pérdida de peso y las temperaturas promedio de TBS y TBH.

### 5.2.1 DETERMINACION DE CURVAS DE SECADO.

Con los datos obtenidos en el proceso de secado se procede a determinar la variación de la humedad mediante la ecuación 2.1, dada en la sección 2.3.

Así tomando de ejemplo las condiciones para  $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $V=5.92 \text{ m/s}$  y  $H=1.5 \text{ cm}$ :

Del anexo V, para un tiempo ( $\theta$ ) = 6 min, la pérdida de peso monitoreada ( $W$ ) es 228.3 gramos.

Siendo el peso de la bandeja ( $w_b$ ) = 62.6 gr.

el peso de la bandeja con sólido seco ( $W_s$ ) = 171.75 gr

Entonces, la humedad se calcula de la siguiente manera:

$$X = \frac{W - W_s}{W_s - w_b} \quad (\text{ec 2.1})$$

$$X = \frac{(228.3 - 171.75)}{(171.75 - 62.6)} =$$

$$X = 0.518094 \quad \frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{gr SS}}$$

## 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL.

Los resultados obtenidos del monitoreo de las variables involucradas en el proceso de secado, se presentan en el anexo V.

En ellas se muestran todas las corridas efectuadas para la silica gel y cebolla; en la presentación de los cuadros se tabula el tiempo ( $\theta$ ) vrs la pérdida de peso y las temperaturas promedio de TBS y TBH.

### 5.2.1 DETERMINACION DE CURVAS DE SECADO.

Con los datos obtenidos en el proceso de secado se procede a determinar la variación de la humedad mediante la ecuación 2.1, dada en la sección 2.3.

Así tomando de ejemplo las condiciones para  $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $V=5.92 \text{ m/s}$  y  $H=1.5 \text{ cm}$ :

Del anexo V, para un tiempo ( $\theta$ ) =6 min, la pérdida de peso monitoreada (W) es 228.3 gramos.

Siendo el peso de la bandeja ( $w_b$ ) = 62.6 gr.

el peso de la bandeja con sólido seco ( $W_s$ ) = 171.75 gr

Entonces, la humedad se calcula de la siguiente manera:

$$X = \frac{W - W_s}{W_s - w_b} \quad (\text{ec 2.1})$$

$$X = \frac{(228.3 - 171.75)}{(171.75 - 62.6)} =$$

$$X = 0.518094 \quad \frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{gr SS}}$$

de igual manera se calculan las humedades a los distintos tiempos para estas y las demás niveles de temperatura, velocidad y espesor; para cada uno de los materiales sometidos a secado.

Posteriormente se plotean los datos de humedad (gr H<sub>2</sub>O/gr SS) vrs tiempo (hrs) y estas son mostradas en la figuras 5.4 y 5.5 para la silica gel y la cebolla respectivamente para cada una de las condiciones seleccionadas.

Cabe mencionar que el monitoreo del Cilantro, los valores de X vrs  $\theta$  no resultaron lo que se esperaba, debido a una fluctuación de los valores de humedad, haciendo que no se distinga los periodos fundamentales de secado. En la figura 5.6 se muestra un lote de las 8 corridas para el cilantro a cada nivel de temperatura, velocidad y espesores seleccionados.

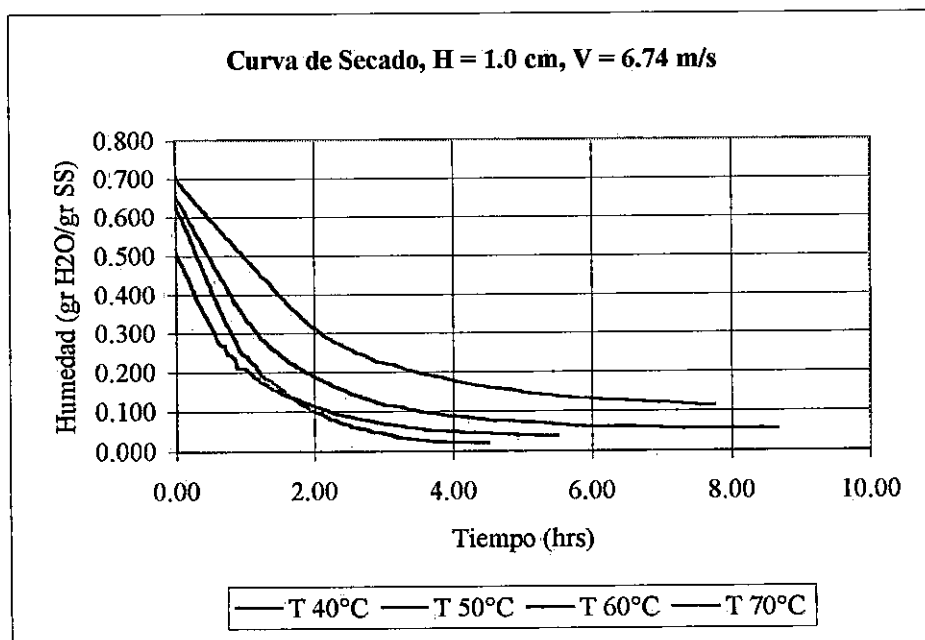
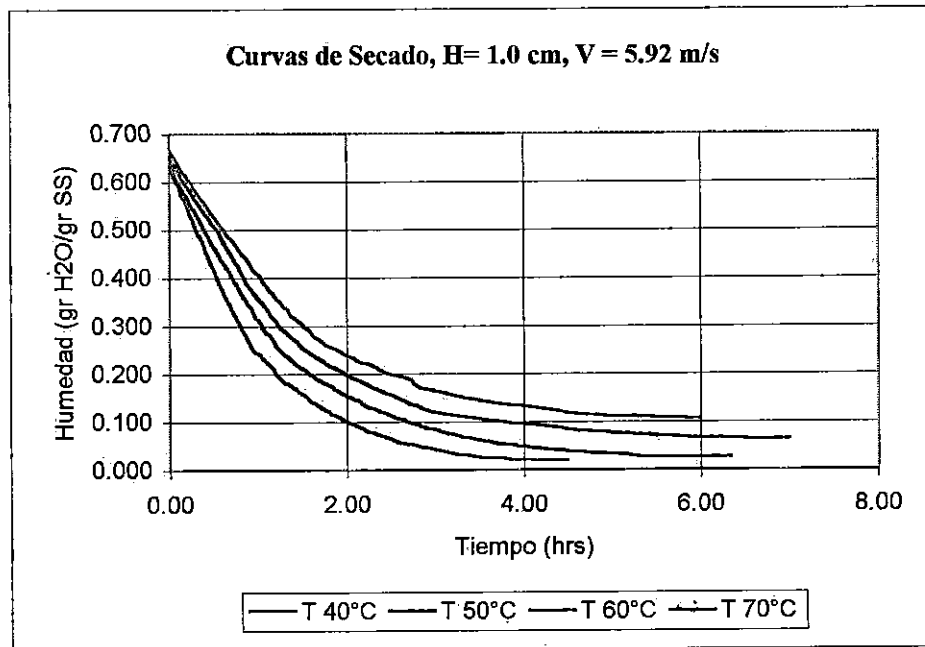
### 5.2.2 MODELADO EMPIRICO DE LOS RESULTADOS.

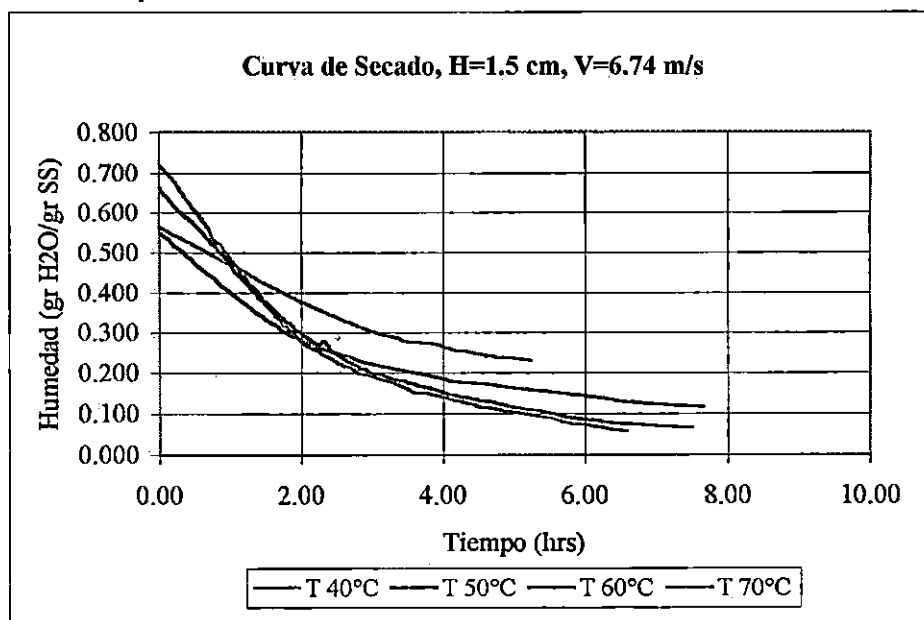
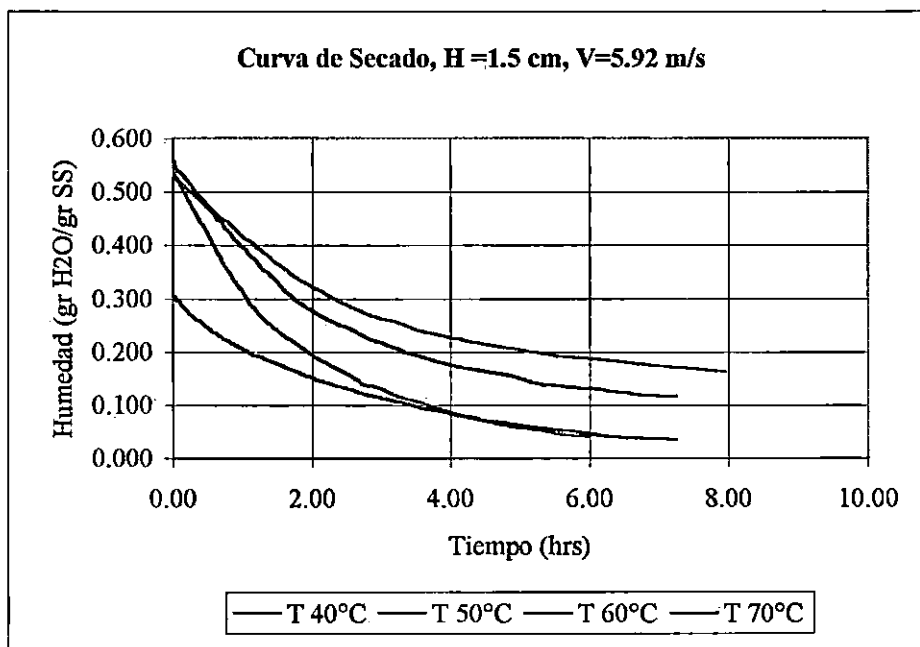
Para el caso de los materiales sometidos a secado se utilizo el software TBLCURVE, el cual determina el modelado empírico de la reproducción matemática del fenómeno de secado para cada nivel de temperatura, velocidad y espesor.

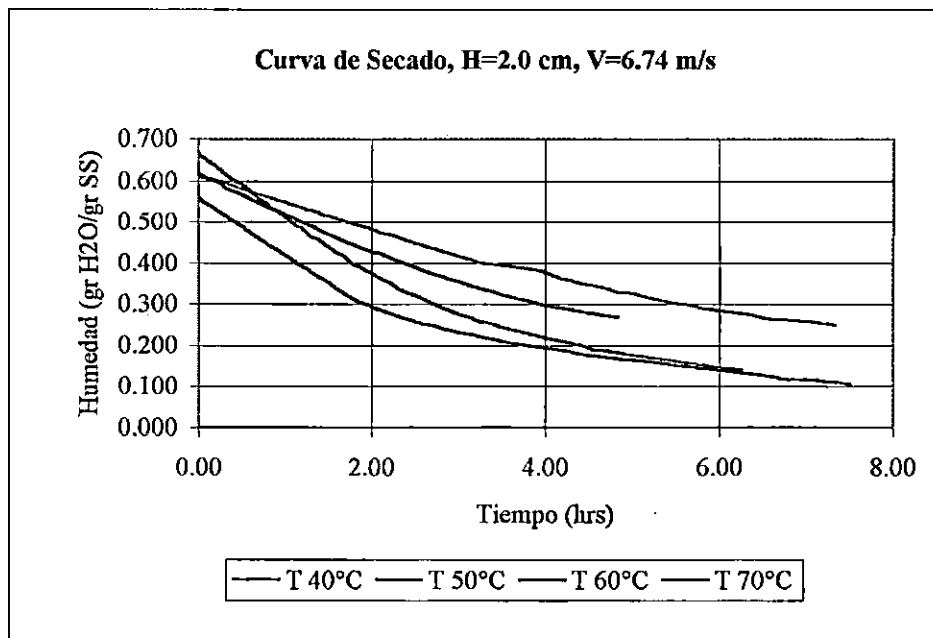
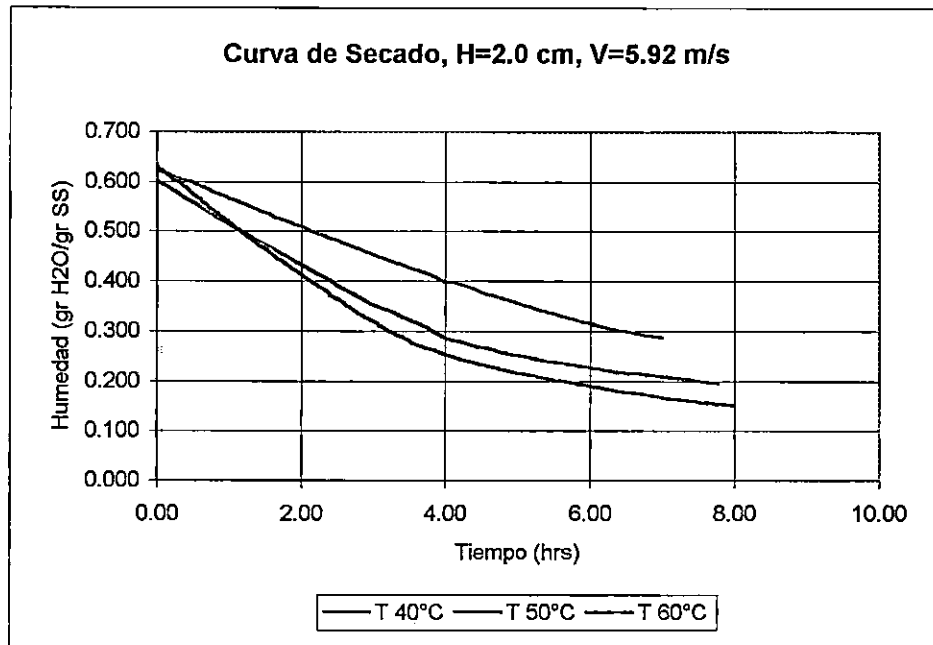
En cuanto a la selección del mejor modelo se tomaron ciertos criterios matemáticos, ya que teóricamente todo modelo de secado sigue una tendencia exponencial. Uno de estos criterios se basaron en la forma de correlacionar los datos en ecuaciones lineales y no lineales. Dentro de las no lineales se eligieron ecuaciones potenciales, primera y segunda exponencial, Gaussianas, Lorenzianas y Logarítmicas. Para las ecuaciones lineales se tomaron los estándares polinomiales y racionales.

Otros criterios para la selección del mejor modelo se dieron en los resultados de las correlaciones, tales como los límites de confiabilidad (95%), % residuos y el coeficiente de correlación ( $r^2$ ). En la figura 5.7. se muestra el ambiente principal del TBLCURVE.

**Fig. 5.4.** Gráficas obtenidas de las pruebas de laboratorio efectuadas a la Silica Gel.  
de acuerdo a los 4 niveles de temperatura ( $T=40,50,60$  y  $70^{\circ}\text{C}$ ), 4 niveles de  
espesores ( $H=1.0,1.5,2.0$  y  $3.0$  cm) y 2 niveles de velocidad ( $v_1=5.92$  m/s y  $v_2=6.74$  m/s).









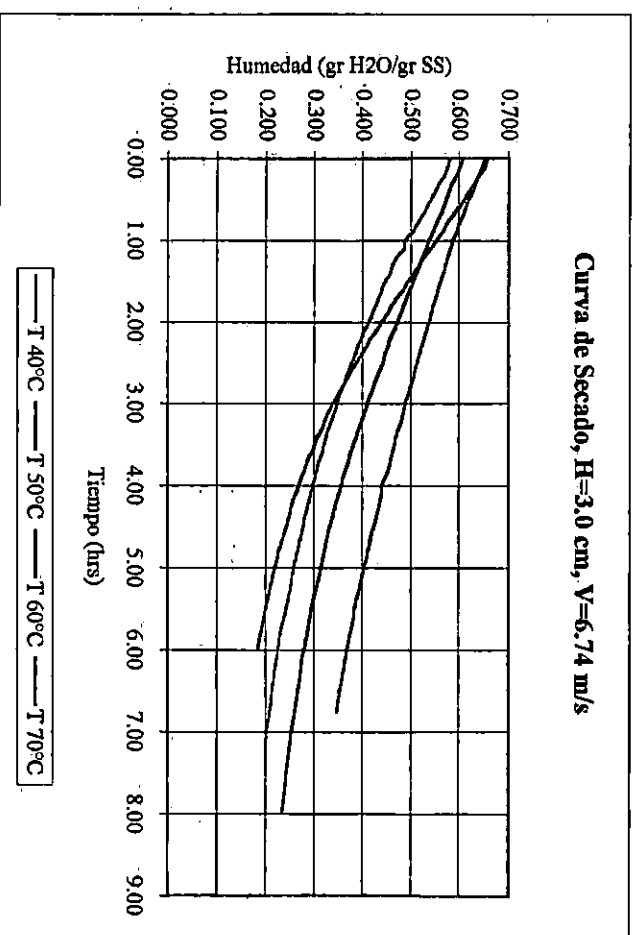
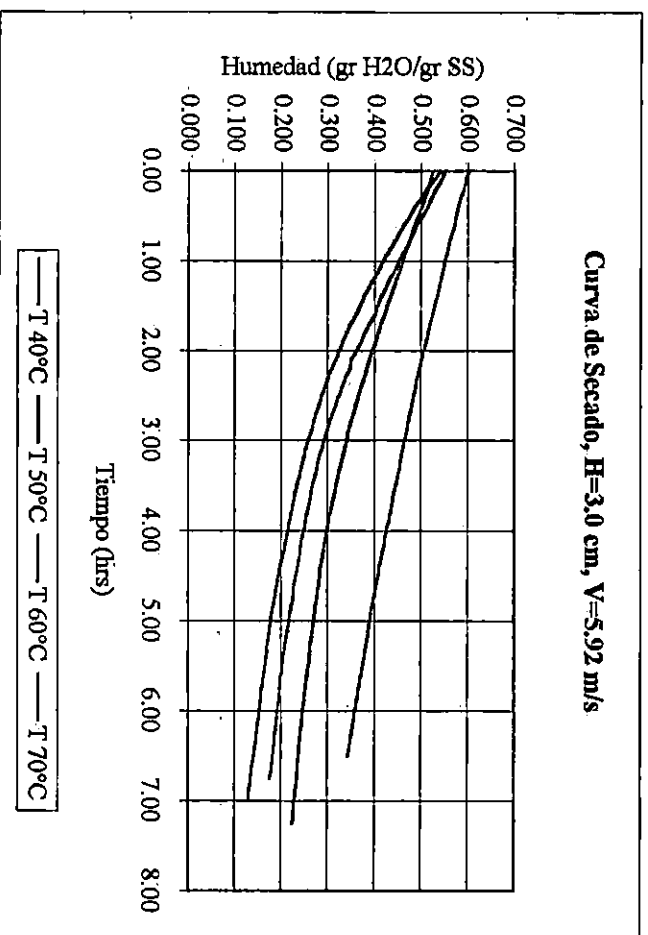
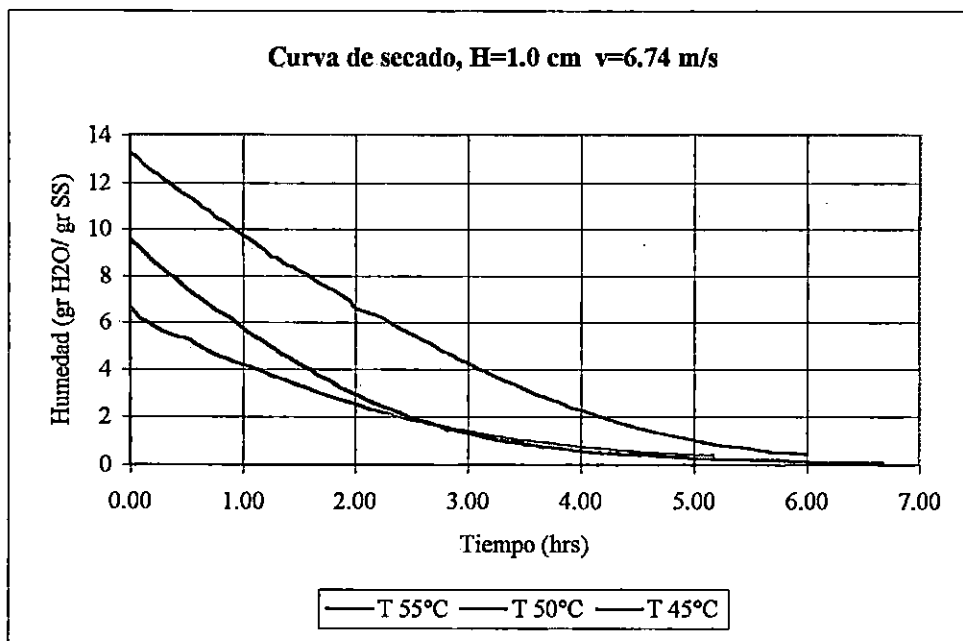
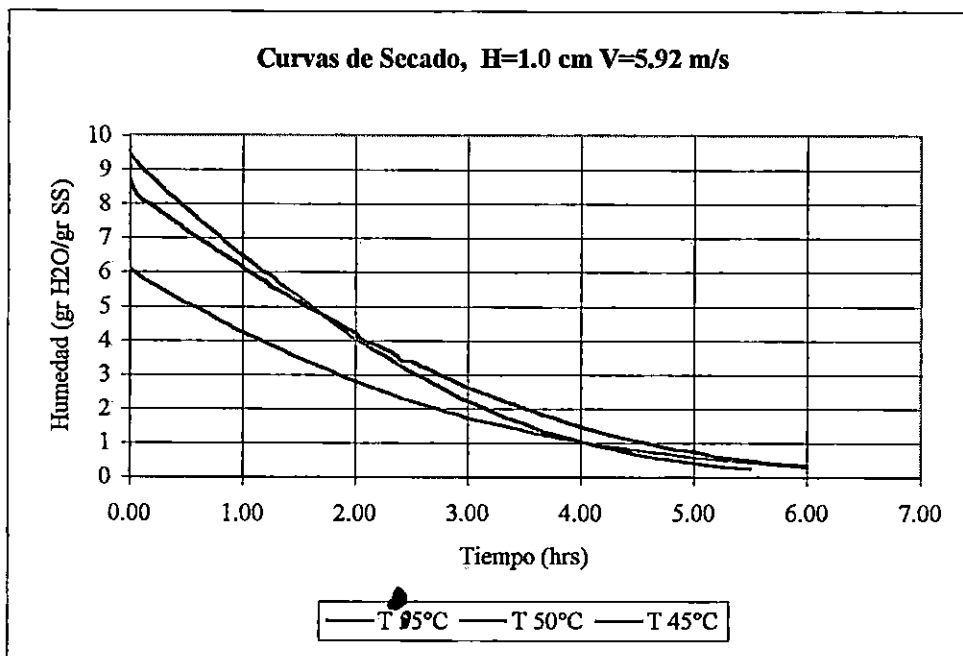
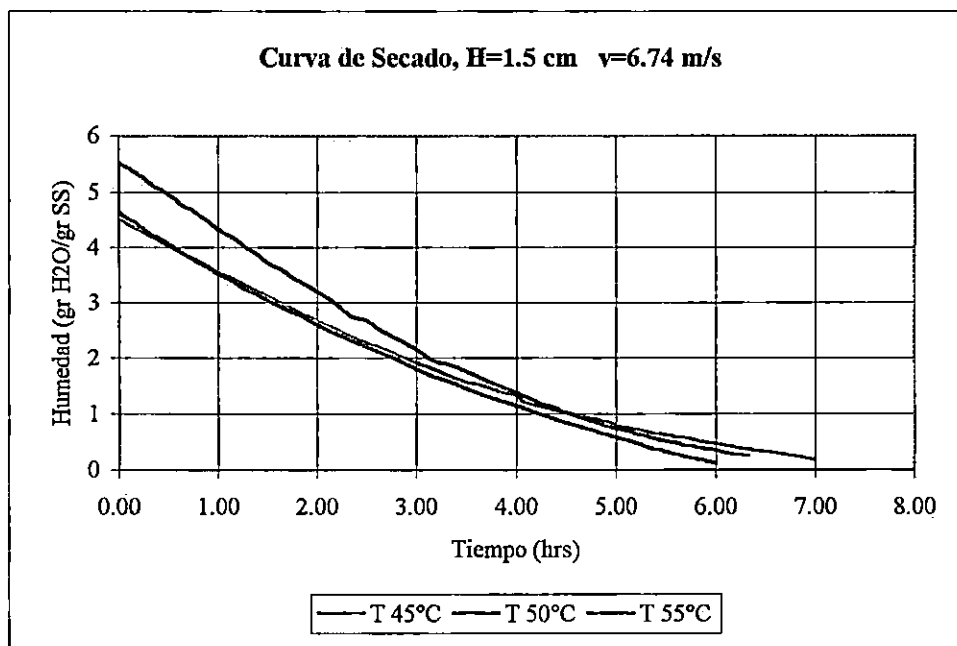
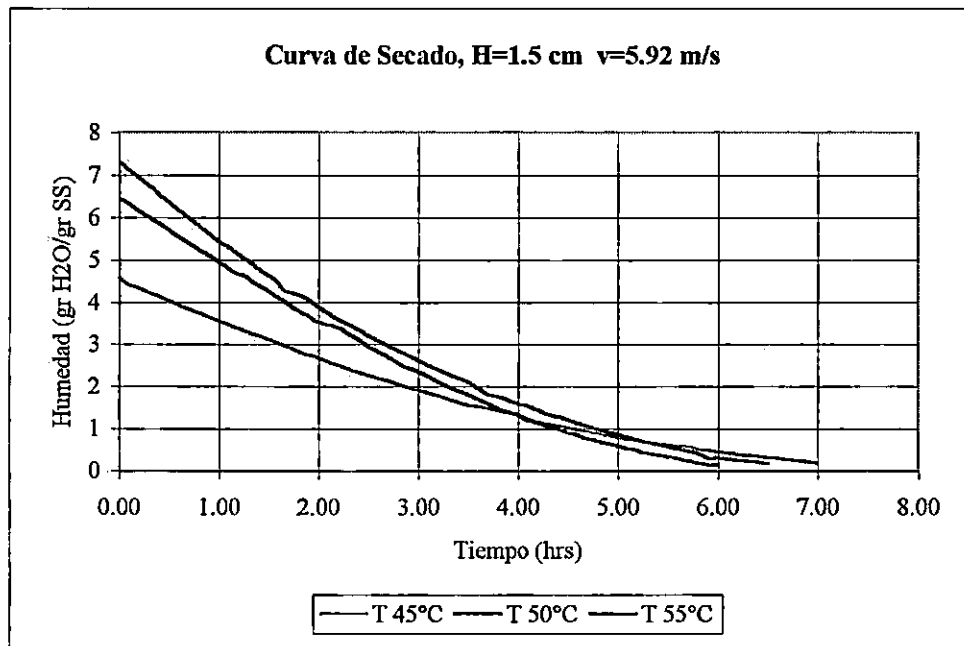


Fig. 5.5. Graficas obtenidas de las pruebas de laboratorio efectuadas a la Cebolla. de acuerdo a los 3 niveles de temperatura ( $T=45,50$  y  $55^{\circ}\text{C}$ ), 2 niveles de espesores ( $H=1.0$  y  $1.5$  cm) y 2 niveles de velocidad ( $v_1=5.92$  m/s y  $v_2=6.74$  m/s).





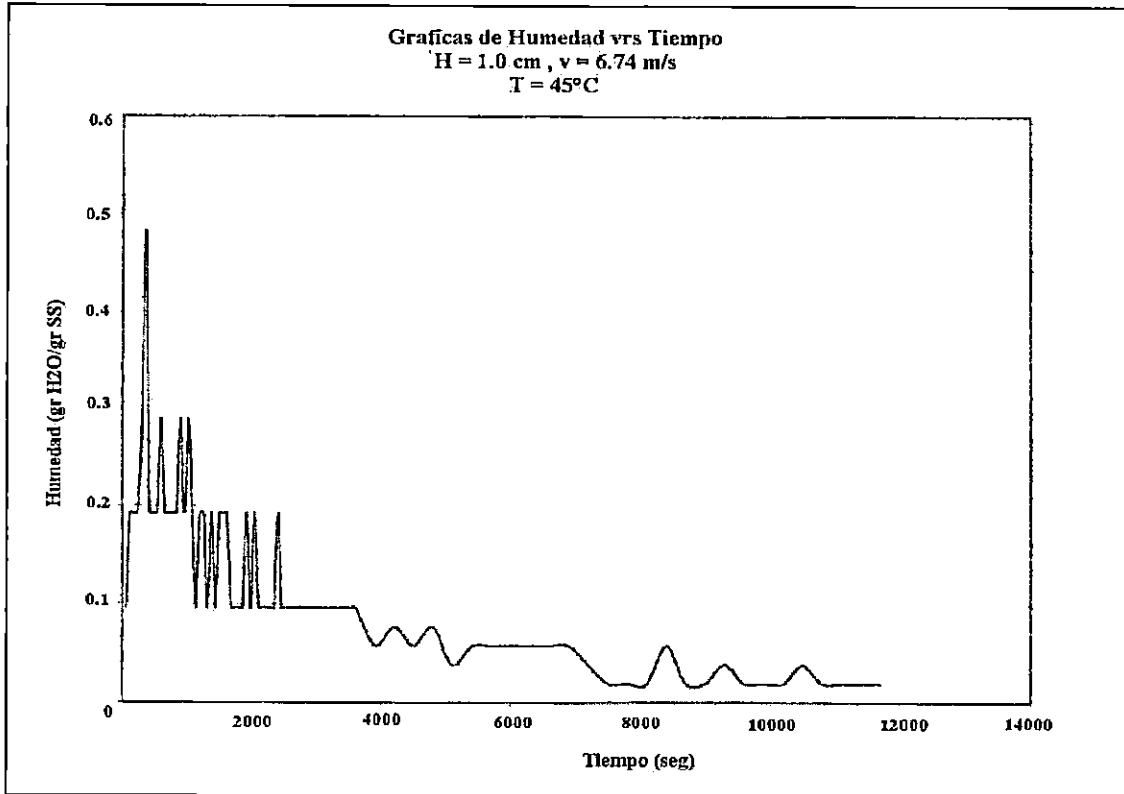


Fig. 5.6. Gráfica de humedad vrs tiempo obtenida en laboratorio para el cilantro

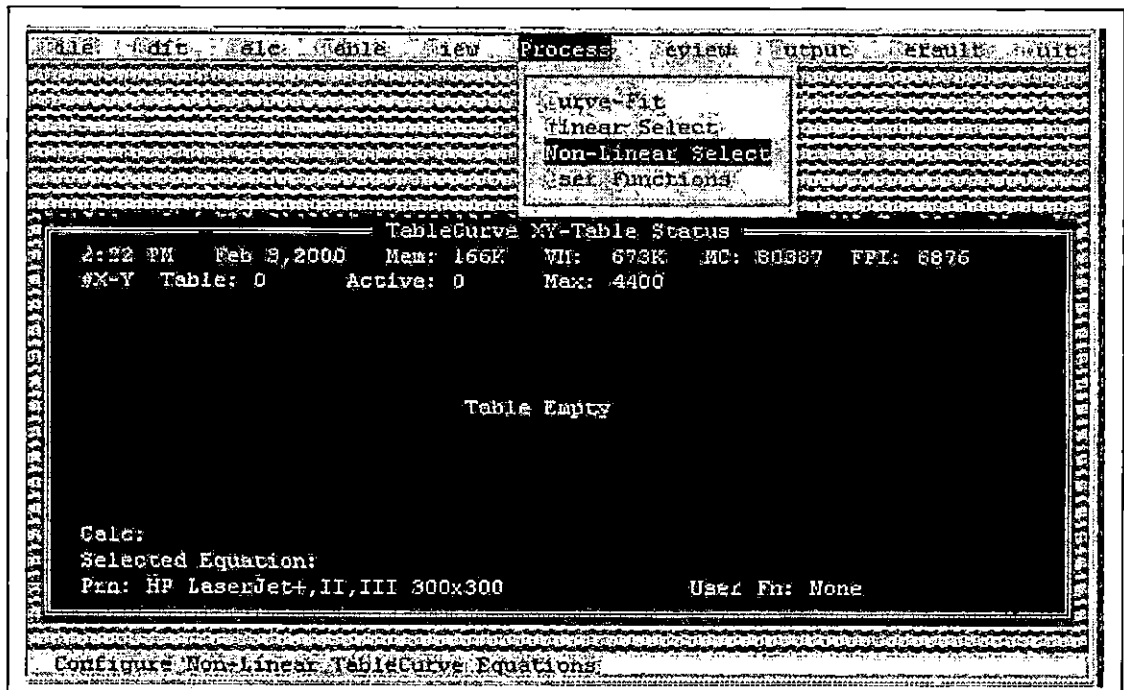


Fig 5.7. Pantalla del menú principal del ambiente del TBLCURVE.

Tomando nuevamente el ejemplo antes presentado y eligiendo la curva en la figura 5.4 para  $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $v=5.92$  m/s y  $H=1.5$  cm, se determina el mejor modelo empírico:

$$X = \frac{a + c\theta + e\theta^2}{1 + b\theta + d\theta^2} \quad (5.3)$$

donde:

$$a = 0.53996886$$

$$b = 0.20133421$$

$$c = -0.04313626$$

$$d = 0.020096337$$

$$e = 0.007143346$$

Al realizar el modelado empírico para cada lote, conviene establecer la estrechez de la relación. Esta medida recibe el nombre de coeficiente de correlación que para este modelo obtenido es de 0.998798.

Posteriormente se calcula la humedad estimada, sustituyendo en la ecuación 5.3:

$$\text{para } \theta = 6 \text{ min (0.1 hr)} \rightarrow X = 0.52505 \text{ gr H}_2\text{O/ gr SS.}$$

Calculando los residuos para la comprobación de la idoneidad del modelo unidireccional es decir que los residuos se determinan restando el valor de tratamiento con el valor estimado de ese tratamiento, entonces:

$$\begin{aligned} X_{\text{residual}} &= X_{\text{tratamiento}} - X_{\text{estimado}} \\ &= 0.51809 - 0.52505 \\ &= -0.00696 \end{aligned} \quad (5.4)$$

En el cuadro 5.4 se presenta los resultados estadísticos del modelo de regresión escogido dado por el TBLCURVE. La tabla de datos presenta los valores de tiempo (hr), las humedades obtenidas, las humedades predecidas por el modelo empírico y los residuos de humedades y los límites de confianza a 95%. Las figuras 5.8 y 5.9 muestran los gráficos de porcentaje de residuos y los límites de confianza respectivamente.

Al analizar el coeficiente de correlación para el cilantro ( $r^2 = 0.76$ ) se observó que no se ajustaba a ningún modelo matemático de los seleccionados. Una de las razones más significativas de la forma de la curva de la figura 5.6, se debe a que este por tener una densidad baja la cantidad de materia depositada en la bandeja para someterlo a secado era insuficiente, por lo que las variaciones en la pérdida de peso no fueran detectadas por el sistema de pesado, que sería también afectado por el desprendimiento de aceites depositados en la bandeja, obteniendo valores erróneos de humedad.

**Cuadro 5.4.** Resultados obtenidos en la determinación del modelado empírico para sílica gel a  $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $v=5.92\text{m/s}$  y  $H= 1.5 \text{ cm}$ .

N°	Tiempo (hr)	X (gr H <sub>2</sub> O/gr SS)	X Estimado	Residuo X	% Residuo X	Limites de Confidencia 95%	
1	0.000	0.53642	0.53997	-0.00355	-0.66200	0.53643	0.54351
2	0.050	0.52451	0.53244	-0.00794	-1.51297	0.52934	0.53555
3	0.100	0.51809	0.52505	-0.00696	-1.34256	0.52231	0.52779
4	0.150	0.51260	0.51779	-0.00519	-1.01257	0.51535	0.52023
5	0.200	0.50618	0.51065	-0.00447	-0.88313	0.50845	0.51286
6	0.250	0.50069	0.50365	-0.00296	-0.59141	0.50162	0.50567
7	0.300	0.49629	0.49677	-0.00048	-0.09631	0.49486	0.49867
8	0.350	0.48969	0.49001	-0.00032	-0.06479	0.48819	0.49183
9	0.400	0.48420	0.48338	0.00082	0.16956	0.48160	0.48515
10	0.450	0.47778	0.47686	0.00092	0.19320	0.47511	0.47861
11	0.500	0.47183	0.47046	0.00136	0.28929	0.46872	0.47220
12	0.550	0.46770	0.46418	0.00352	0.75319	0.46245	0.46592
13	0.600	0.46038	0.45802	0.00236	0.51244	0.45628	0.45975
14	0.650	0.45534	0.45196	0.00337	0.74078	0.45023	0.45369
15	0.700	0.45030	0.44602	0.00428	0.94954	0.44430	0.44774
16	0.750	0.44572	0.44019	0.00553	1.24004	0.43848	0.44190
17	0.800	0.44251	0.43447	0.00804	1.81801	0.43278	0.43616
18	0.850	0.43472	0.42885	0.00588	1.35162	0.42718	0.43051
19	0.900	0.43014	0.42333	0.00681	1.58296	0.42170	0.42497
20	1.000	0.41732	0.41261	0.00470	1.12730	0.41104	0.41418
21	1.050	0.41136	0.40740	0.00396	0.96276	0.40587	0.40893
22	1.117	0.40678	0.40060	0.00618	1.51827	0.39912	0.40209
23	1.150	0.40266	0.39727	0.00539	1.33800	0.39581	0.39873
24	1.200	0.39716	0.39235	0.00481	1.21197	0.39092	0.39377
25	1.267	0.39029	0.38593	0.00436	1.11760	0.38453	0.38732
26	1.300	0.38617	0.38278	0.00339	0.87739	0.38140	0.38416
27	1.350	0.38177	0.37813	0.00364	0.95335	0.37676	0.37949
28	1.400	0.37627	0.37357	0.00270	0.71846	0.37221	0.37493
29	1.450	0.37059	0.36909	0.00150	0.40400	0.36773	0.37046
30	1.500	0.36601	0.36470	0.00131	0.35661	0.36333	0.36608
31	1.550	0.36143	0.36040	0.00103	0.28486	0.35901	0.36179
32	1.600	0.35731	0.35618	0.00113	0.31617	0.35476	0.35760
33	1.650	0.35273	0.35203	0.00069	0.19588	0.35058	0.35349
34	1.700	0.34631	0.34797	-0.00166	-0.47923	0.34648	0.34946
35	1.800	0.33715	0.34008	-0.00293	-0.86866	0.33850	0.34166
36	1.850	0.33303	0.33625	-0.00322	-0.96650	0.33462	0.33788
37	1.950	0.32661	0.32880	-0.00219	-0.66959	0.32707	0.33053
38	2.000	0.32203	0.32519	-0.00315	-0.97909	0.32341	0.32697
39	2.050	0.31837	0.32164	-0.00327	-1.02803	0.31982	0.32347
40	2.100	0.31608	0.31817	-0.00209	-0.66039	0.31630	0.32004
41	2.150	0.31351	0.31476	-0.00124	-0.39686	0.31285	0.31667
42	2.200	0.30857	0.31142	-0.00285	-0.92344	0.30947	0.31337

43	2.250	0.30463	0.30814	-0.00351	-1.15289	0.30615	0.31012
44	2.300	0.30096	0.30493	-0.00396	-1.31700	0.30291	0.30694
45	2.350	0.29776	0.30178	-0.00402	-1.35012	0.29973	0.30382
46	2.400	0.29455	0.29869	-0.00414	-1.40488	0.29662	0.30075
47	2.450	0.29088	0.29566	-0.00477	-1.64145	0.29358	0.29774
48	2.500	0.28814	0.29269	-0.00455	-1.58071	0.29060	0.29478
49	2.550	0.28539	0.28978	-0.00439	-1.53924	0.28768	0.29188
50	2.600	0.28218	0.28693	-0.00475	-1.68203	0.28483	0.28902
51	2.783	0.27210	0.27694	-0.00484	-1.77738	0.27488	0.27900
52	2.850	0.26798	0.27348	-0.00550	-2.05415	0.27145	0.27552
53	3.000	0.26248	0.26604	-0.00356	-1.35592	0.26410	0.26799
54	3.150	0.25836	0.25904	-0.00068	-0.26136	0.25720	0.26087
55	3.550	0.24049	0.24231	-0.00181	-0.75329	0.24071	0.24390
56	3.650	0.23683	0.23853	-0.00170	-0.71940	0.23694	0.24013
57	3.750	0.23408	0.23491	-0.00083	-0.35529	0.23328	0.23655
58	3.850	0.23133	0.23144	-0.00011	-0.04579	0.22972	0.23316
59	3.950	0.22858	0.22811	0.00048	0.20948	0.22625	0.22996
60	4.050	0.22538	0.22491	0.00047	0.20843	0.22289	0.22692
61	4.150	0.22309	0.22184	0.00125	0.55855	0.21963	0.22405
62	4.250	0.22034	0.21890	0.00144	0.65277	0.21648	0.22132
63	4.717	0.20934	0.20671	0.00263	1.25799	0.20319	0.21024
64	4.817	0.20660	0.20440	0.00219	1.06219	0.20065	0.20815
65	4.917	0.20568	0.20219	0.00349	1.69656	0.19822	0.20616
66	5.167	0.20018	0.19707	0.00311	1.55561	0.19263	0.20150
67	5.417	0.19469	0.19249	0.00220	1.12972	0.18773	0.19725
68	5.667	0.19011	0.18840	0.00171	0.89919	0.18350	0.19329
69	5.917	0.18827	0.18475	0.00352	1.86949	0.17994	0.18957
70	6.417	0.18278	0.17866	0.00412	2.25284	0.17470	0.18261
71	6.917	0.17453	0.17393	0.00060	0.34541	0.17096	0.17689
72	7.417	0.16903	0.17033	-0.00130	-0.76934	0.16482	0.17584
73	7.950	0.16262	0.16754	-0.00492	-3.02654	0.15536	0.17973



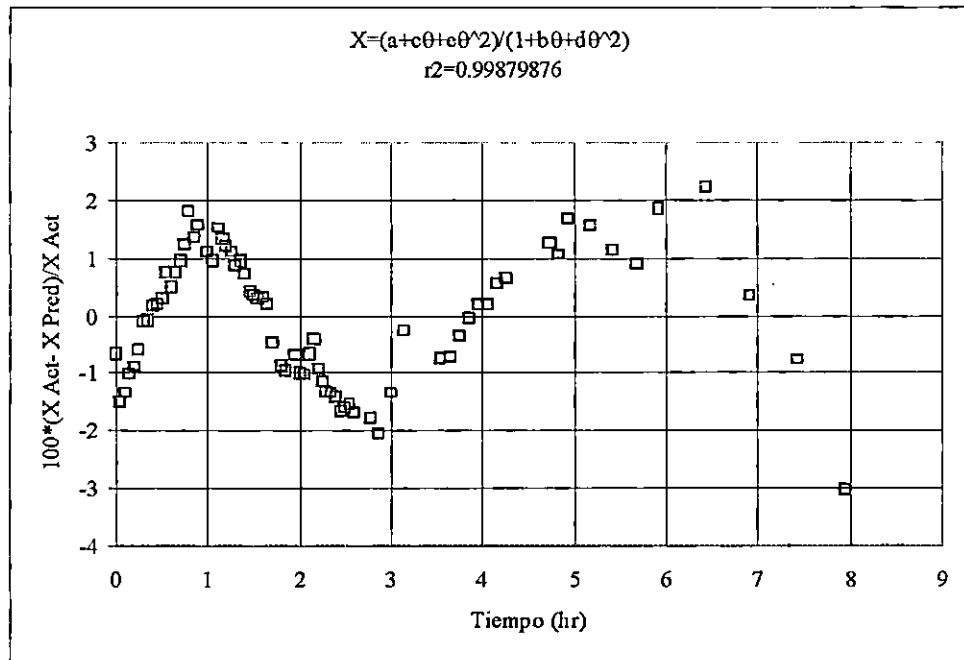


Fig. 5.8. Representación del porcentaje de residuos vrs tiempo (hrs)

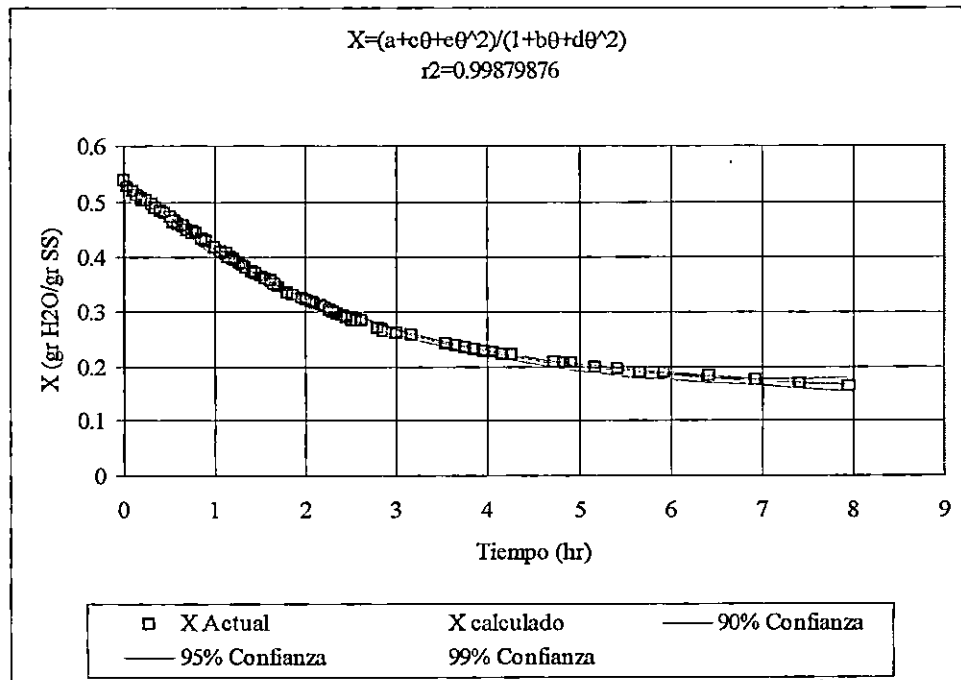


Fig. 5.9. Representación de los limites de confianza a 90, 95 y 99 % vrs tiempo (hrs)

Obsérvese que por la figura 5.8, los residuos no tienen estructura alguna, ni patrones obvios, lo cual nos indica la independencia de las variables ( $H$ ,  $\theta$ ,  $v$  y  $T$ ) con respecto a la humedad  $X$ .

De esta manera se realiza el mismo procedimiento para cada uno de las corridas efectuadas a los materiales. En el cuadro 5.5 y 5.6 se presentan los modelos empíricos para la sílica gel y cebolla respectivamente.

### 5.2.3 DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE EVAPORACION.

Para la determinación de la velocidad de secado, se necesita obtener el cambio de la humedad con respecto al tiempo ( $dX/d\theta$ ). Esta variación también se obtiene de realizar el modelado empírico del fenómeno de secado, los resultados se presentan en el cuadro 5.7.

Por medio de la ecuación 2.2 dada en la sección 2.2.3, se procederá a calcular la velocidad de evaporación:

Entonces:

Retomando el valor de  $\theta = 6$  min (0.1 hr), para los niveles seleccionados de  $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $v = 5.92$  m/s y  $H = 1.5$  cm; del cuadro 5.7:

$$\frac{dX}{d\theta} = 0.1465485 \frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{gr SS hr}}$$

El área de la superficie efectiva de secado, se obtiene de las dimensiones de la bandeja dadas en el cuadro 4.6: Para  $H=1.5$  cm las dimensiones son:

Largo = 12.3 cm

Ancho = 9.0 cm

**Cuadro 5.5.** Modelado empírico, correlacionando los datos calculados de X vrs  $\theta$  en TBLCURVE, para la Silica Gel

Espesor (H) cm	v m/s	T°C	Modelo matemático	a	b	c	d	e
1.0	5.92	40	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.66904777	0.25754005	-0.12102488	0.17798858	0.028203173
		50	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.65743872	0.33061012	-0.085533677	0.31997889	0.02341101
		60	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.6502521	0.4471354	-0.15261483	0.18505811	0.015097128
		70	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.65770241	0.59314322	-0.25075334	0.14045822	0.029119532
	6.74	40	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.69249188	0.17443661	-0.01598949	0.25826277	0.024567734
		50	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.668468026	0.4745792	-0.08201592	0.29320865	0.020087508
		60	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.53072414	1.035386	-0.13183259	-0.052323668	0.012776816
		70	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.65770241	0.59314322	-0.25075334	0.14045822	0.029119532
1.5	5.92	40	$X = (a + C\theta + e\theta^2) / (1 + b\theta + d\theta^2)$	0.53996886	0.20133421	-0.043136263	0.020096337	0.0071433466
		50	$X = a + b \text{ EXP}(-\theta/c)$	0.10251054	0.46288303	2.1422789	-----	-----
		60	$X = a \text{ EXP}(-\theta/b) + c \text{ EXP}(-\theta/d)$	0.038455244	0.46281546	0.26689244	3.481483	-----
		70	$X = a \text{ EXP}(-\theta/b) + c \text{ EXP}(-\theta/d)$	0.30882631	1.2345198	0.23957548	3.3812001	-----
	6.74	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c)/d)^2)$	0.149726954	0.430803258	-0.638643144	2.775112614	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c)/d)^2)$	0.095456293	0.52841536	-0.85026845	2.1417338	-----
		60	$X = a + b / (1 + ((\theta - c)/d)^2)$	0.02922441	0.66394561	-0.52291063	2.1112074	-----
		70	$X = a + b / (1 + ((\theta - c)/d)^2)$	0.026128582	0.73558869	-0.44925648	1.8343011	-----

Espesor (H) cm	v m/s	T°C	Modelo matemático	a	b	c	d	e
2.0	5.92	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.013809783	0.72615712	-3.5143619	8.0594186	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.1197505	0.49647435	-0.75771709	3.5315714	-----
		60	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.08602667	0.5659795	-0.72287824	3.123459	-----
		70	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.026128582	0.73558869	-0.44925648	1.8343011	-----
	6.74	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.063493459	0.64798477	-2.6736079	6.3059307	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.098781947	0.61629825	-1.7442997	3.9986486	-----
		60	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.075742332	0.59553318	-1.1618396	2.4729031	-----
3.0	5.92	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-0.09571297	1.513926	-14.717056	13.579513	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.15858712	0.4041009	-1.2269465	-1.2269465	-----
		60	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.040444957	0.85024605	-2.8946628	3.4709018	-----
		70	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.026128582	0.73558869	-0.44925648	1.8343011	-----
	6.74	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-0.042586494	1.6517743	-12.554256	10.684689	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.11284717	0.55614882	-1.8412938	5.1517445	-----
		60	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.06822955	0.77676583	-3.3419465	4.7528483	-----
		70	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	0.050538346	0.64463019	-0.8465909	3.4797592	-----

**Cuadro 5.6.** Modelado empírico, correlacionando los datos calculados de X vrs  $\theta$  en TBLCURVE, para la Cebolla

Espesor (H) cm	v m/s	T°C	Modelo matemático	a	b	c	d	e
1.0	5.92	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-0.89727428	8.1286064	-1.2436116	2.953297	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-1.9737119	12.622485	-0.98785067	2.8438	-----
		55	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-2.0743104	12.424538	-1.535946	3.5476375	-----
	6.74	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-3.773464	19.605997	-1.4945335	3.7375198	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-0.82909024	8.566398	-1.0452926	2.4263253	-----
		55	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-0.640551449	10.26274111	-0.331532027	1.689541679	-----
1.5	5.92	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-1.3030505	6.9611937	-2.0767259	4.686857	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	2.3413899	9.8359762	-1.4943746	4.2584562	-----
		55	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-2.237769799	12.18189765	-2.2333876	4.23777715	-----
	6.74	40	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-1.3030505	6.9611937	-2.0767259	4.686857	-----
		50	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-1.5447575	7.7923318	-1.3236701	4.103285	-----
		55	$X = a + b / (1 + ((\theta - c) / d)^2)$	-3.730649478	20.04501402	-8.105174906	6.85786267	-----

El peso del sólido seco (SS) se obtiene del cuadro I.4 en el anexo V para las condiciones de operación antes mencionadas, cuyo valor se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{SS} &= \text{Peso de bandeja con SS} - \text{peso de bandeja} \\ &= 171.75 - 62.6 \\ &= 109.15 \text{ gr} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación 2.2:

$$\begin{aligned} N &= \frac{109.15}{(12.3 \times 9.0)} \times 0.1465485 \\ N &= 0.144496 \quad \frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{cm}^2 \text{ hr}} \end{aligned}$$

De igual manera se calcula para los demás valores y de le da el mismo tratamiento para los otros niveles de operación tanto para la silica gel y la cebolla.

Posteriormente se plotean los valores de velocidad de evaporación (N) contra humedad (X) para cada una de las condiciones de operación. En las figuras 5.10 se presentan los gráficos de N vrs X para la silica gel, en cada uno de los niveles seleccionados. Cada gráfico esta construido a manera de mantener el espesor y la velocidad del aire constantes, con el objeto de observar las variaciones de las curvas con respecto a la temperatura.. En la figura 5.11 se presentan las curvas de velocidad de evaporación para la cebolla.

En estas gráficas se identifican los períodos de secado constante y decrecientes. Nótese que para el período decreciente en todos los niveles de temperatura, para la silica gel son líneas rectas como se predijo en el capítulo 2.0 por ser un material poroso, granular e inorgánico.

Para la cebolla, se identifican también los 2 períodos, el de secado constante y período decreciente. En este último se identifica una sección lineal correspondiente al mecanismo de flujo capilar que es la que predomina en la mayor parte de este período. Existe también

**Cuadro 5.7.** Valores obtenidos de velocidad de evaporación para la silica gel , operando  
 $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $v = 5.92 \text{ m/s}$  y  $H = 1.5 \text{ cm}$

Tiempo (hr)	X (gr H <sub>2</sub> O/gr SS)	dx/do (gr H <sub>2</sub> O/gr SS hr)	N (gr H <sub>2</sub> O/cm <sup>2</sup> hr)
0.000	0.53642	0.15185	0.14972
0.050	0.52451	0.14918	0.14709
0.100	0.51809	0.14655	0.14450
0.150	0.51260	0.14395	0.14194
0.200	0.50618	0.14139	0.13941
0.250	0.50069	0.13886	0.13692
0.300	0.49629	0.13637	0.13446
0.350	0.48969	0.13392	0.13204
0.400	0.48420	0.13150	0.12966
0.450	0.47778	0.12912	0.12731
0.500	0.47183	0.12677	0.12499
0.550	0.46770	0.12446	0.12271
0.600	0.46038	0.12218	0.12047
0.650	0.45534	0.11994	0.11826
0.700	0.45030	0.11773	0.11608
0.750	0.44572	0.11556	0.11394
0.800	0.44251	0.11342	0.11183
0.850	0.43472	0.11132	0.10976
0.900	0.43014	0.10925	0.10772
1.000	0.41732	0.10521	0.10374
1.050	0.41136	0.10324	0.10179
1.117	0.40678	0.10066	0.09925
1.150	0.40266	0.09940	0.09801
1.200	0.39716	0.09752	0.09616
1.267	0.39029	0.09508	0.09374
1.300	0.38617	0.09387	0.09256
1.350	0.38177	0.09209	0.09080
1.400	0.37627	0.09034	0.08908
1.450	0.37059	0.08863	0.08738
1.500	0.36601	0.08694	0.08572
1.550	0.36143	0.08528	0.08408
1.600	0.35731	0.08365	0.08247
1.650	0.35273	0.08204	0.08089
1.700	0.34631	0.08047	0.07934
1.800	0.33715	0.07740	0.07632
1.850	0.33303	0.07591	0.07485
1.950	0.32661	0.07301	0.07198
2.000	0.32203	0.07159	0.07059
2.050	0.31837	0.07020	0.06922
2.100	0.31608	0.06884	0.06788

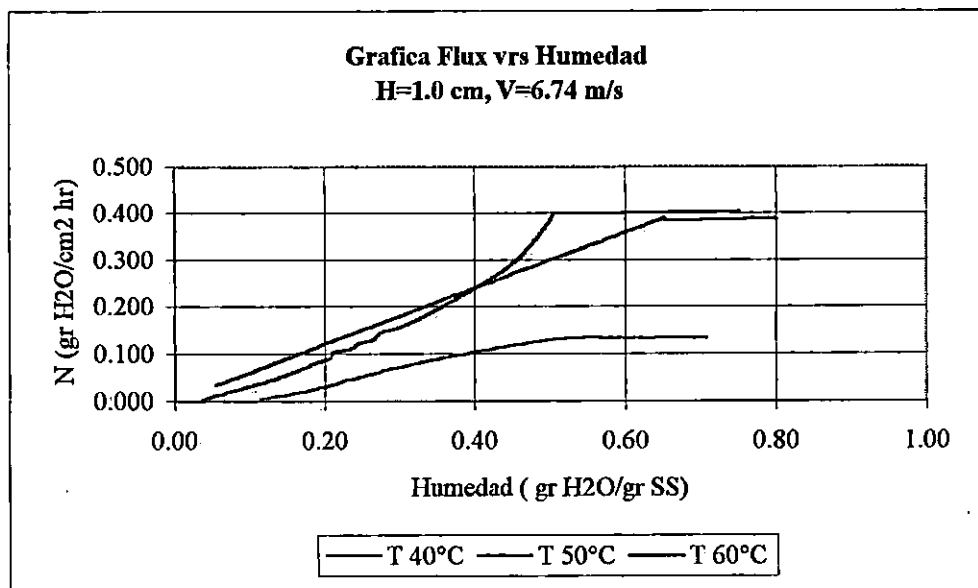
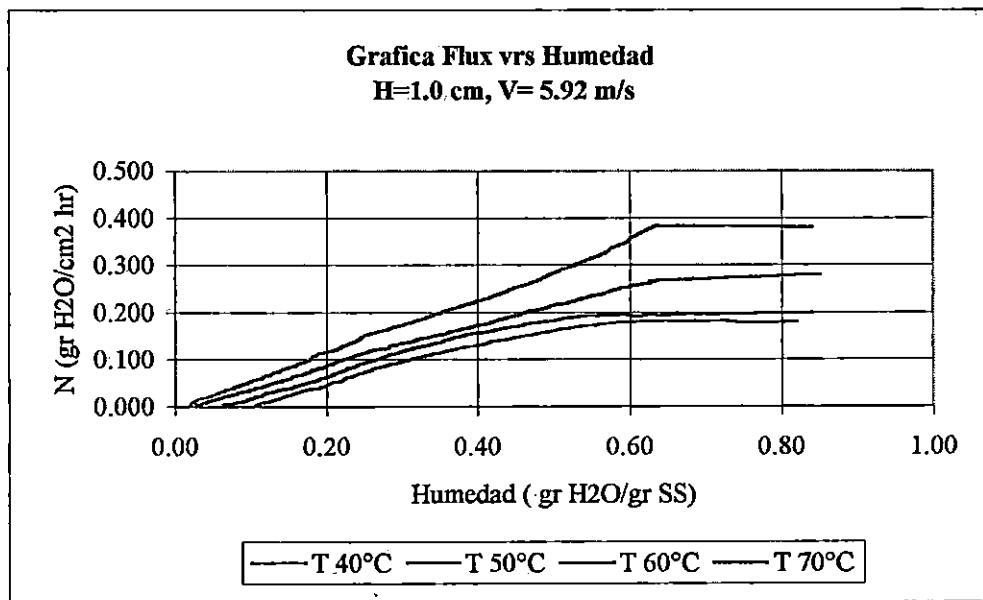
2.150	0.31351	0.06750	0.06656
2.200	0.30857	0.06619	0.06526
2.250	0.30463	0.06490	0.06399
2.300	0.30096	0.06363	0.06274
2.350	0.29776	0.06238	0.06151
2.400	0.29455	0.06116	0.06031
2.450	0.29088	0.05996	0.05912
2.500	0.28814	0.05879	0.05796
2.550	0.28539	0.05763	0.05682
2.600	0.28218	0.05649	0.05570
2.783	0.27210	0.05251	0.05177
2.850	0.26798	0.05113	0.05041
3.000	0.26248	0.04814	0.04746
3.150	0.25836	0.04531	0.04468
3.550	0.24049	0.03850	0.03797
3.650	0.23683	0.03696	0.03644
3.750	0.23408	0.03547	0.03497
3.850	0.23133	0.03403	0.03355
3.950	0.22858	0.03265	0.03219
4.050	0.22538	0.03131	0.03087
4.150	0.22309	0.03003	0.02961
4.250	0.22034	0.02879	0.02839
4.717	0.20934	0.02360	0.02327
4.817	0.20660	0.02260	0.02228
4.917	0.20568	0.02163	0.02133
5.167	0.20018	0.01937	0.01910
5.417	0.19469	0.01732	0.01707
5.667	0.19011	0.01544	0.01522
5.917	0.18827	0.01373	0.01354
6.417	0.18278	0.01074	0.01059
6.917	0.17453	0.00826	0.00814
7.417	0.16903	0.00618	0.00610
7.950	0.16262	0.00435	0.00429

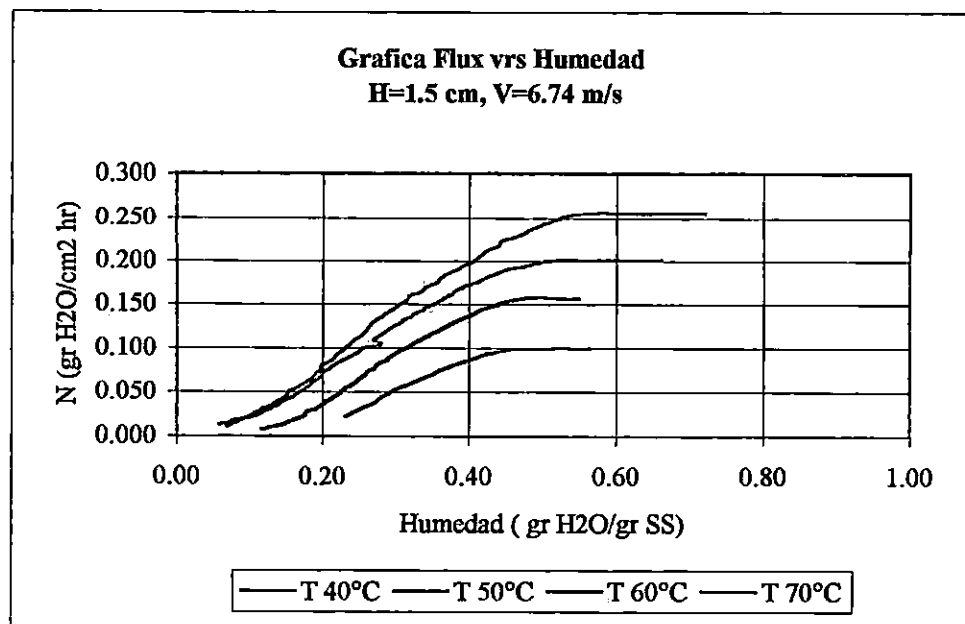
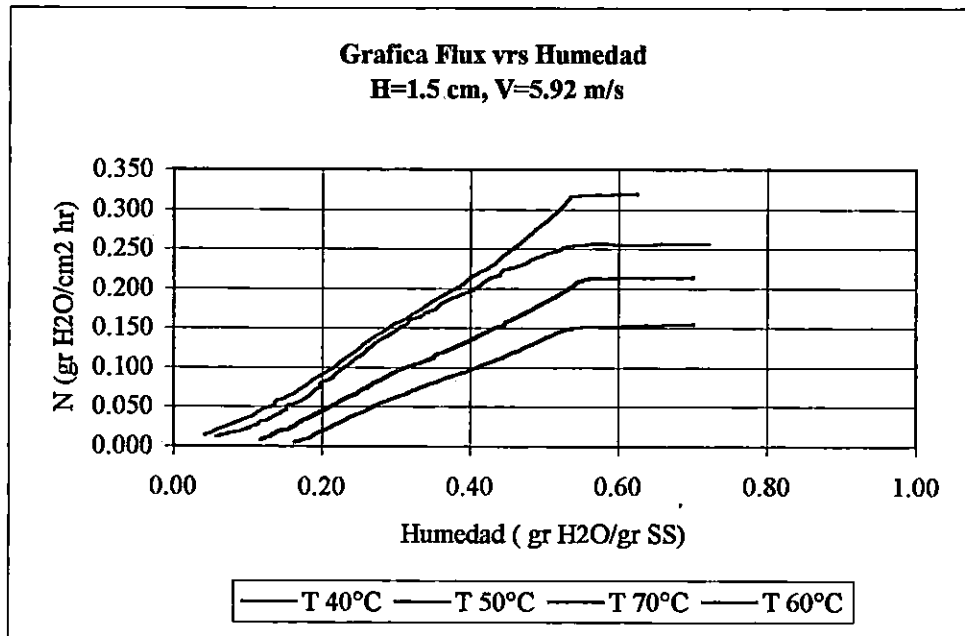
una pequeña sección que es cóncava hacia abajo donde predomina básicamente el mecanismo de difusión líquida interna.

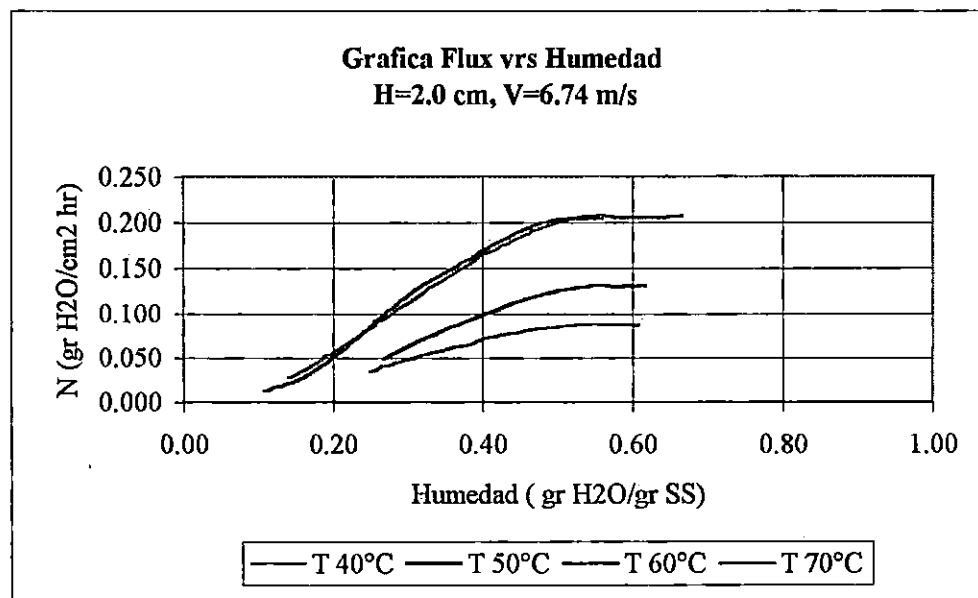
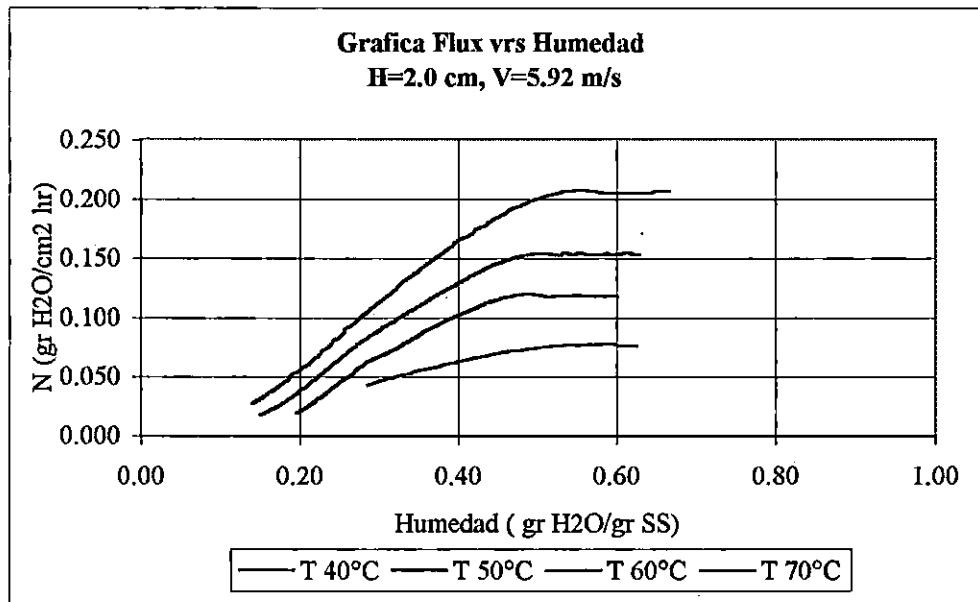
Es importante la identificación de tales zonas, ya que las gráficas de las figuras 5.10 y 5.11 se leerán ciertos parámetros que servirán para el escalamiento al nivel piloto tales como la humedad inicial ( $X_0$ ), humedad crítica ( $X_c$ ), humedad final ( $X_f$ ), tiempo de secado constante, tiempo total de secado etc., como se detallara mas adelante.



Fig. 5.10. Graficas de velocidad de evaporacion contra humedad para la Silica Gel. de acuerdo a los 4 niveles de temperatura ( $T=40,50,60$  y  $70^{\circ}\text{C}$ ), 4 niveles de espesores ( $H=1.0,1.5,2.0$  y  $3.0$  cm) y 2 niveles de velocidad ( $v_1=5.92$  m/s y  $v_2=6.74$  m/s).







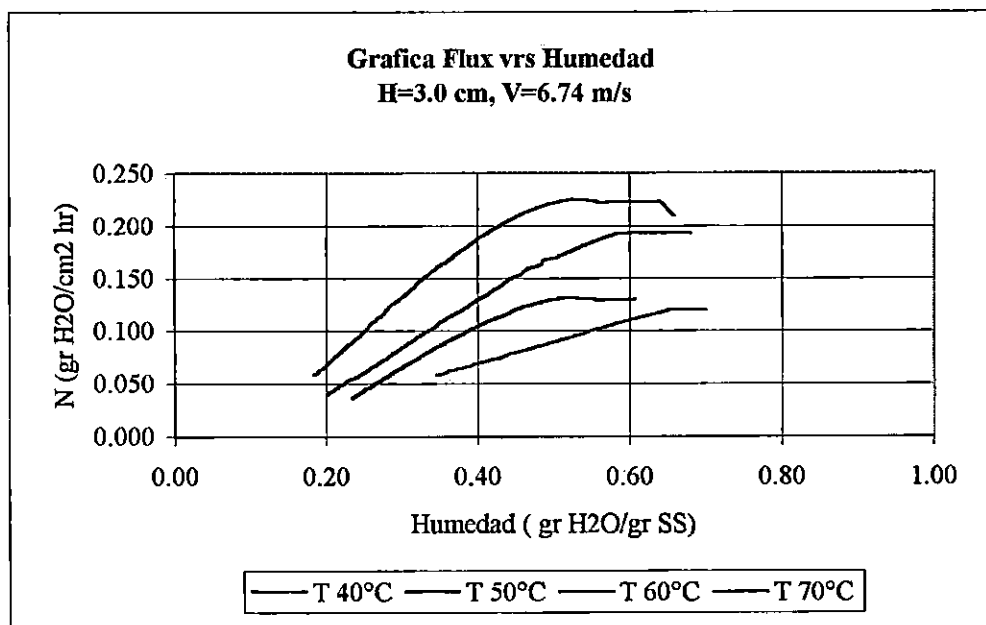
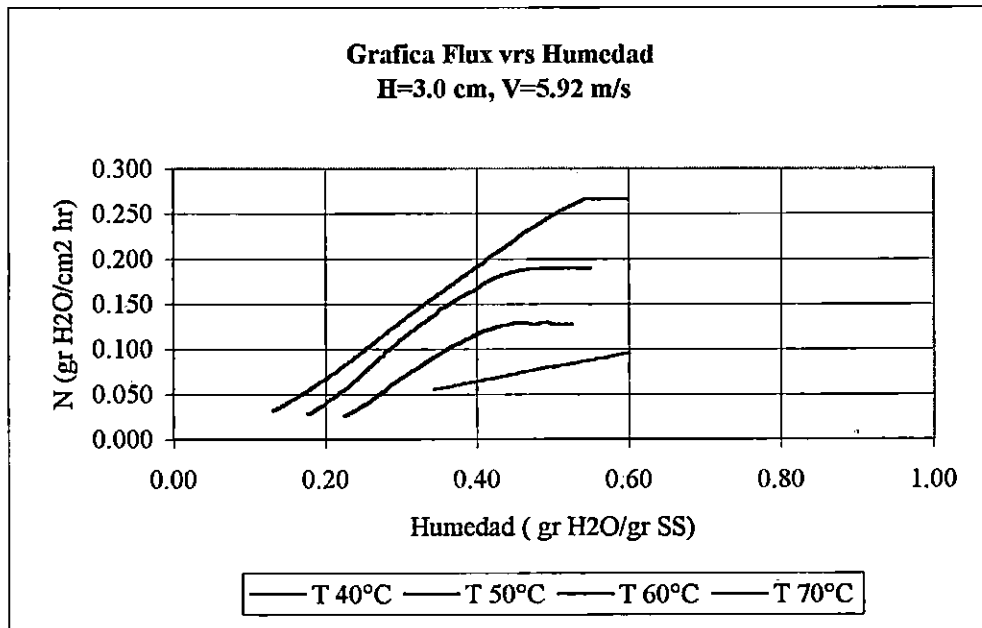
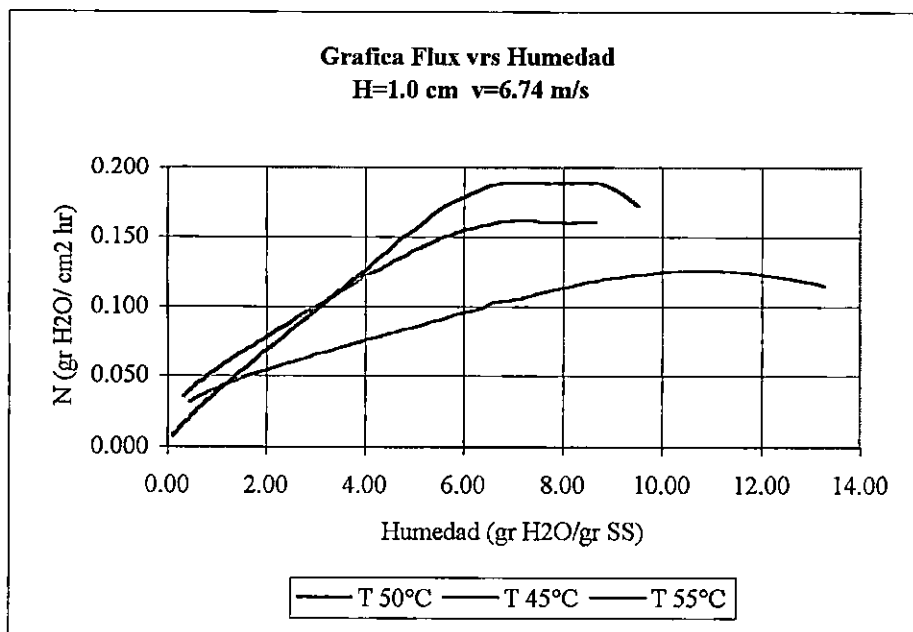
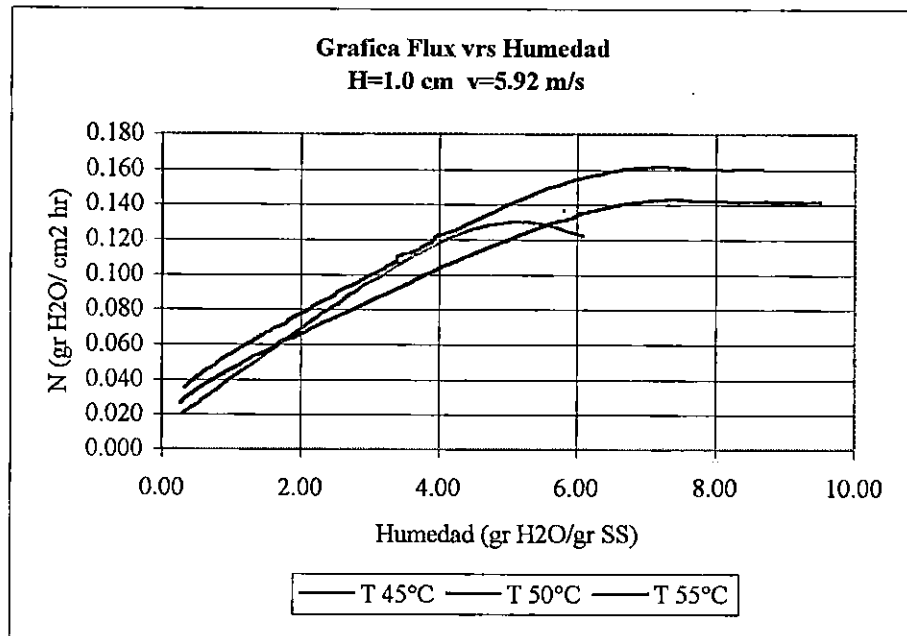
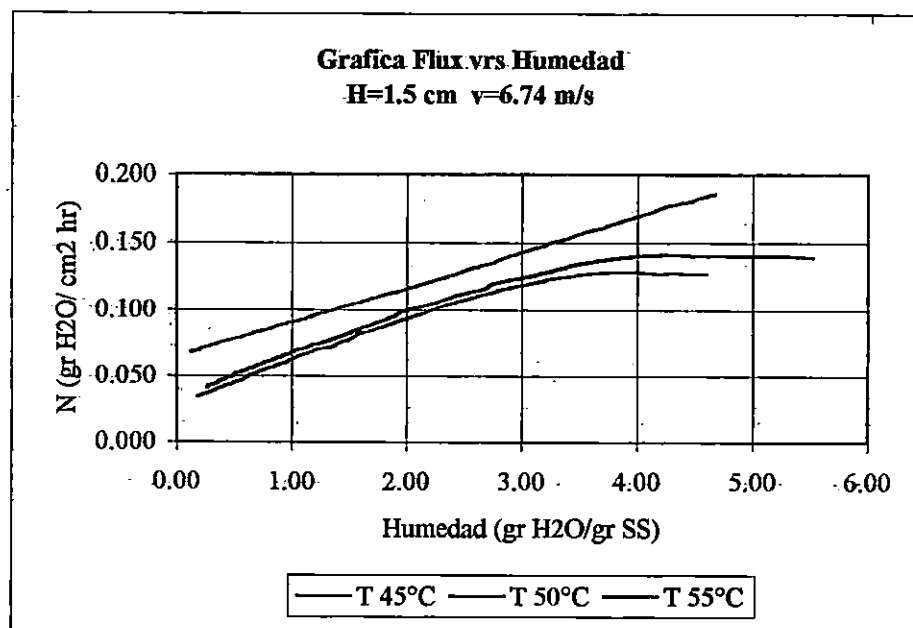
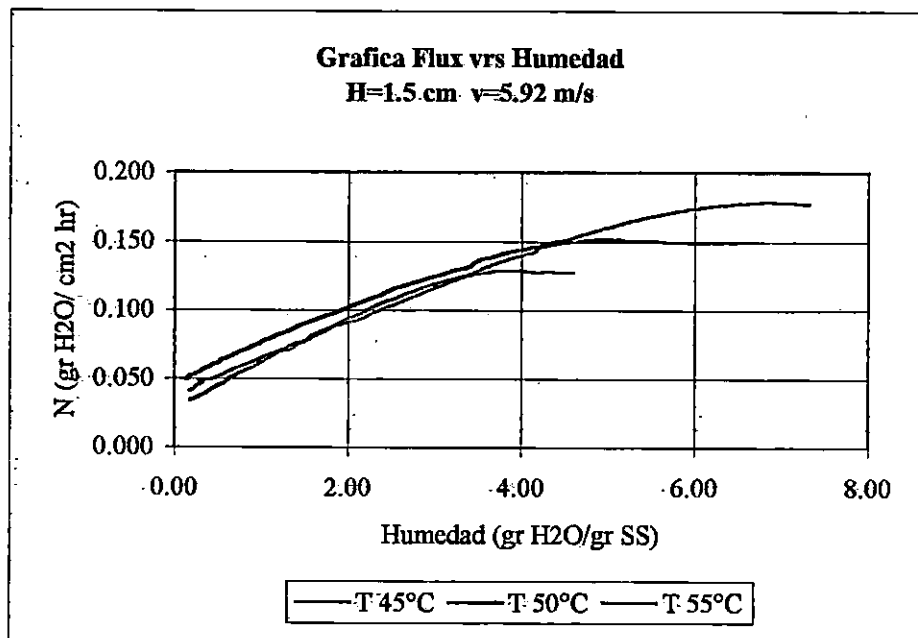


Fig. 5.11. Gráficas de velocidad de evaporación contra la humedad para la Cebolla. de acuerdo a los 3 niveles de temperatura ( $T=45, 50$  y  $55^{\circ}\text{C}$ ), 2 niveles de espesores ( $H=1.0$  y  $1.5$  cm) y 2 niveles de velocidad ( $v_1=5.92$  m/s y  $v_2=6.74$  m/s).





### 5.3 CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO FINAL.

Una vez determinada las curvas de velocidad de evaporación, se procede a reportar los resultados cualitativos de las características de los productos, tales como;

- Contracción.
- Uniformidad de la humedad final del producto.

#### 5.3.1 CONTRACCION.

La contracción no es mas que el encogimiento del material debido a la pérdida de humedad por efecto del incremento de la temperatura.

En el caso de la silica gel no presenta contracción, debido a la naturaleza inorgánica, sus propiedades de absorción de humedad no se vieron dañadas a las condiciones seleccionadas.

Para la cebolla y el cilantro, en las pruebas preliminares de secado si presentaban bastante contracción, pero esto fue controlado por el secado lento en el rango de 45 a 55°C en el secador al nivel de laboratorio.

#### 5.3.2 UNIFORMIDAD DE LA HUMEDAD FINAL

Al finalizar el proceso de secado para los 3 materiales, en la silica gel se observó un secado uniforme en su superficie y en el seno del sólido; por tanto el retardamiento de la velocidad de transferencia de calor con relación a la transferencia de masa en el período decreciente era insignificante, debido al flujo capilar de la humedad dentro del grano.

Para la cebolla al secarse completamente su forma es transformada en filamentos muy delgados, presenta una disminución en su tamaño con un desprendimiento de olor

característico durante y después del secado. Al finalizar el proceso de secado se observaba algunas partículas aún húmedas, teniendo forma de filamentos gruesos de color blanco traslúcidos por lo que se vuelve muy difícil aplicar una reducción de tamaño para mejorar la apariencia del producto final.

En el caso del cilantro, existió una uniformidad completa al finalizar el proceso de secado. Para alcanzar la humedad final de  $X=0.02$  (fig 5.6) se llevaba aproximadamente 2 horas, por lo que el secado era completamente rápido. En la figura 5.12 se presenta la forma físicas de los productos finales cuando se someten a secado.

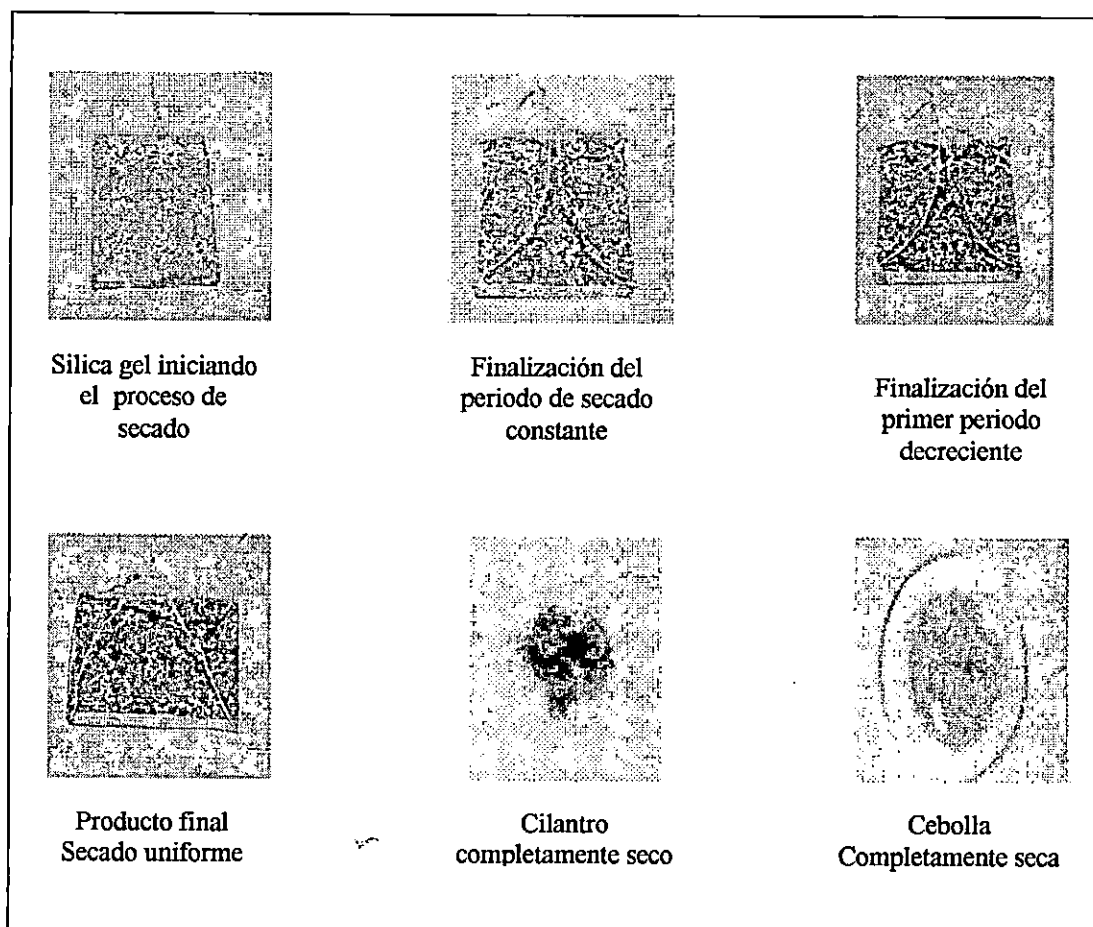


Fig. 5.12. Uniformidad de los materiales sometidos a secado.



#### 5.4 REPORTE DE RESULTADOS.

Desarrollado la etapa de experimentación y obtenidas las curvas de velocidad de evaporación, se procederá a tabular los resultados obtenidos de la sílica gel, que servirán posteriormente para el escalamiento del secador al nivel planta piloto. Los parámetros que se reportarán serán los siguientes y son mostrados en el cuadro 5.8:

- Humedad inicial ( $X_0$ ).
- Humedad crítica ( $X_c$ ).
- Humedad final ( $X_f$ ). Estas humedades son leídas de la figura 5.10
- Velocidad del medio secante ( $v$ ) y Espesor utilizado ( $H$ ).
- Temperaturas de secado (TBS y TBH).
- Tiempo de secado en el periodo constante.

**Cuadro 5.8.** Resultados que se utilizaran para el escalamiento del secador al nivel piloto.

Espesor (H) cm	v m/s	TBS °C	TBH °C	$\theta$ (hrs)	$X_1$	$X_c$	$X_f$
1.0	5.92	40	27	0.722	0.65	0.61	0.12
		50	36	0.510	0.64	0.61	0.09
		60	41	0.128	0.64	0.63	0.045
		70	41	0.171	0.65	0.63	0.035
	6.74	40	28	2.286	0.71	0.58	0.13
		50	31	0.794	0.65	0.67	0.07
		60	32	0.158	0.52	0.50	0.02
		70	40	0.448	0.71	0.65	0.045
1.5	5.92	40	28	0.879	0.58	0.55	0.18
		50	30	0.180	0.56	0.55	0.15
		60	32	0.394	0.53	0.55	0.07
		70	33	0.610	0.32	0.54	0.01
	6.74	40	28	1.056	0.57	0.49	0.19
		50	30	1.296	0.57	0.49	0.12
		60	32	2.011	0.65	0.48	0.08
		70	34	1.597	0.72	0.55	0.03

2.0	5.92	40	29	0.853	0.62	0.6	0.2	
		50	30	2.878	0.62	0.50	0.15	
		60	31	1.694	0.60	0.5	0.11	
	6.74	70	36	1.768	0.65	0.53	0.08	
		40	29	1.921	0.61	0.56	0.18	
		50	31	1.136	0.61	0.56	0.18	
	3.0	5.92	60	33	1.145	0.58	0.51	0.09
			70	34	1.882	0.66	0.51	0.08
			40	30	1.417	0.60	0.6	0.22
3.0	6.74	50	34	4.053	0.52	0.43	0.19	
		60	33	1.093	0.53	0.49	0.16	
		70	34	0.838	0.54	0.56	0.1	
	6.74	40	28	3.713	0.7	0.63	0.23	
		50	31	2.052	0.61	0.55	0.19	
		60	34	2.807	0.68	0.57	0.15	
	3.0	5.92	70	35	3.296	0.67	0.5	0.10

## 5.5 ESCALAMIENTO DEL SECADOR AL NIVEL PILOTO.

Para el escalamiento del secador, se simulará las mismas condiciones utilizadas en laboratorio, es decir que los espesores, las velocidades y las temperaturas que predominaron en el laboratorio, se simulan al nivel piloto.

Para el diseño del secador al nivel piloto, lo importante es estimar el espaciado de bandeja del arreglo paralelo tal y como se describe en la sección 1.3.1.

Así, para el secado en un secador de bandejas, donde el aire pasa en flujo paralelo sobre la superficie de la bandeja, las condiciones del aire no permanecen constantes, tal y como se muestra en la figura 5.13.

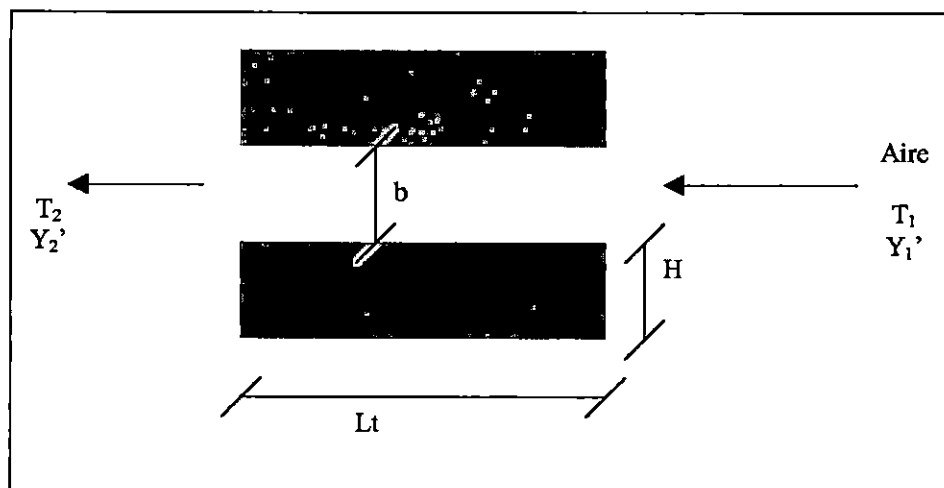


Fig. 5.13. Representación del paso del aire sobre una bandeja con espaciado  $b$ .

Por la ecuación presentada por Geankoplis (1996), para el período de secado constante (SI):

$$\theta = \frac{H \rho_s L_t \lambda_w (X_1 - X_c)}{G C_s b (T_1 - T_w) \left( 1 - \text{EXP} \left( \frac{-h L_t}{G C_s b} \right) \right)} \quad (5.5)$$

donde:

$\theta$ : es el tiempo del período de secado constante (s).

H: es la altura de la bandeja, definido anteriormente (m).

$\rho_s$ : densidad del sólido seco ( $\text{kg/m}^3$ ).

$L_t$ : ancho de bandeja (m).

$\lambda_w$ : calor latente del agua a la temperatura de la superficie del sólido (Joule / kg).

G: es la velocidad másica del aire ( $\text{kg/m}^2 \text{ s}$  de sección transversal).

Cs: es el calor húmedo de la mezcla aire-agua (Joule/kg AS K).

b: es el espaciado de bandeja (m).

$T_1$ : es la temperatura que predomina en el secador

$T_w$ : es la temperatura de la superficie húmeda, que en este período es la temperatura de bulbo húmedo del aire.

h: es el coeficiente de transferencia de calor ( $\text{Watt /m}^2 \text{ K}$ )

Para el calculo del espaciado, se retomará el ejemplo para la silica gel a las condiciones de  $H=1.5 \text{ cm}$ ,  $v = 5.92 \text{ m/s}$  y  $T=40^\circ\text{C}$ .

Por el cuadro 5.8, las condiciones psicrométricas monitoreadas en el proceso de secado:

$$TBS = 40^\circ\text{C} = T_1$$

$$TBH = 28^\circ\text{C} = T_w$$

de la figura I.1 del anexo II, determinamos la humedad absoluta,  $Y' = 0.017 \text{ kg H}_2\text{O / kg Aire seco}$ .

Para la determinación de  $\lambda_w$  se hará uso de las tablas de vapor:

$$T_w=28^\circ\text{C} \rightarrow \lambda_w=2.4354 \times 10^6 \text{ Joule/kg}$$

Del cuadro 3.2, la densidad de la silica gel seca,  $\rho_s$  es  $2220 \text{ kg/m}^3$ .

De los gráficos de velocidad de evaporación de la figura 5.10 para la silica gel se leerá las humedad inicial, crítica y el tiempo de secado en el período de secado constante, los cuales están tabulados en el cuadro 5.8.

$$X_1=0.58 ; X_c=0.55; \theta = 0.88 \text{ hrs.}$$

El calculo del gasto de aire está dado por:  $G=v \rho$ , donde:

$\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ), aplicando la ecuación del gas ideal, se tiene

$$\rho = \frac{P M_b}{R T} = \frac{1 \times 28.97}{82.06 \times 10^{-3} (40 + 273)}$$

$$\rho = 1.1273 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{entonces: } G = 5.92 \times 1.1273 = 6.67 \text{ kg / m}^2 \text{ s} = 24,026.40 \text{ kg/m}^2 \text{ hr}$$

El calor húmedo para el sistema aire – agua, según Treybal (1988) viene dado por:

$$C_s = ( 1005 + 1884 Y^2 ) \quad \text{Joule / kg A.S K}$$

Sustituyendo:

$$C_s = 1037.028 \text{ Joule / kg A.S K}$$

Para el calculo del coeficiente de transferencia de calor, en ausencia del mismo, en flujo de aire que circula paralelamente sobre la superficie de evaporación, se utilizará la ecuación 2.10, sustituyendo:

$$h_c = 0.0204 (24,026.4)^{0.8} = 65.19 \text{ Watt/m}^2 \text{ K}$$

Para la construcción del secador piloto como se detallará en el capítulo 6.0, el sistema constara de 3 bandejas en paralelo, con espesores de 1.5,2.0 y 3.0 cm cuyas dimensiones son: 30 cm de largo x 23 de ancho.

Sustituyendo en la ecuación 5.5 e iterando para b:

$$b = 0.061 \text{ mt} = 6.1 \text{ cm}$$

De la misma manera se realiza los cálculos del espaciado de bandeja para los demás niveles de operación y estos son mostrados en el cuadro 5.9.

Para cada nivel de operación se tomarán el valor máximo y mínimo de espaciado de bandeja y se evaluará el promedio de ellos. Estos valores serán los espaciados que servirán para el diseño y construcción del secador piloto al nivel de planta piloto, tal como se muestran en el cuadro 5.10.

**Cuadro 5.10.** Valores de espaciado de bandeja que servirá para el diseño y construcción del secador al nivel planta piloto.

ESPESOR (cm)	Espaciado max y min (cm)	Espaciado escogido (cm)
H = 1.5	7.1	6.5
	6.1	
H = 2.0	6.59	6.0
	5.56	
H = 3.0	4.5	5.0
	5.5	

**Cuadro 5.9.** Resultados obtenidos para el escalamiento del secador al nivel de planta piloto.

Espe- sor H (cm)	V (m/s)	TBS °C	TBH °C	Y'	$\theta$ (hrs)	X1	Xc	Xf	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>2</sup> hr)	$\lambda_w$ (J/kg)	Cs (J/kg °K)	h (W/m <sup>2</sup> K)	b (m)
1.0	5.92	40	27	0.018	0.722	0.65	0.61	0.12	1.12737	24026.40	2437800	1038.912	65.1900	0.064
		50	36	0.033	0.510	0.64	0.61	0.09	1.09248	23282.90	2416400	1067.172	63.5711	0.068
		60	41	0.042	0.128	0.64	0.63	0.045	1.05969	22584.03	2404500	1084.128	62.0399	0.069
		70	41	0.037	0.171	0.65	0.63	0.035	1.02880	21925.89	2404500	1074.708	60.5893	0.071
	6.74	40	28	0.017	2.286	0.71	0.58	0.13	1.12737	27354.39	2435400	1037.028	72.3189	0.065
		50	31	0.021	0.794	0.67	0.60	0.07	1.09248	26507.89	2428300	1044.564	70.5229	0.072
		60	32	0.018	0.158	0.52	0.5	0.02	1.05969	25712.22	2425900	1038.912	68.8243	0.073
		70	40	0.036	0.448	0.71	0.65	0.045	1.02880	24962.92	2406900	1072.824	67.2150	0.074
1.5	5.92	40	28	0.017	0.879	0.58	0.55	0.18	1.12737	24026.40	2435400	1037.028	65.1900	0.061
		50	30	0.019	0.180	0.56	0.55	0.15	1.09248	23282.90	2430700	1040.796	63.5711	0.063
		60	32	0.018	0.394	0.55	0.52	0.07	1.05969	22584.03	2425900	1038.912	62.0399	0.065
		70	33	0.017	0.610	0.54	0.48	0.01	1.02880	21925.89	2423600	1037.028	60.5893	0.067
	6.74	40	28	0.017	1.056	0.57	0.43	0.19	1.12737	27354.39	2435400	1037.028	72.3189	0.064
		50	30	0.019	1.296	0.57	0.49	0.12	1.09248	26507.89	2430700	1040.796	70.5229	0.065
		60	32	0.016	2.011	0.65	0.48	0.08	1.05969	25712.22	2425900	1035.144	68.8243	0.068
		70	34	0.0195	1.597	0.72	0.55	0.03	1.02880	24962.92	2421200	1041.738	67.2150	0.071

Espesor H (cm)	V (m/s)	TBS °C	TBH °C	Y'	$\theta$ (hrs)	Xl	Xc	Xf	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>2</sup> hr)	$\lambda_w$ (J/kg)	Cs (J/kg °K)	h (W/m <sup>2</sup> K)	b (m)
2.0	5.92	40	29	0.022	0.853	0.62	0.6	0.2	1.12737	24026.40	2433100	1046.448	65.1900	0.056
		50	30	0.019	2.878	0.62	0.5	0.15	1.09248	23282.90	2430700	1040.796	63.5711	0.064
		60	31	0.017	1.694	0.6	0.5	0.11	1.05969	22584.03	2428300	1037.028	62.0399	0.063
		70	36	0.024	1.768	0.65	0.53	0.08	1.02880	21925.89	2416400	1050.216	60.5893	0.059
	6.74	40	29	0.022	1.921	0.61	0.56	0.18	1.12737	27354.39	2433100	1046.448	72.3189	0.057
		50	31	0.022	1.136	0.61	0.56	0.18	1.09248	26507.89	2428300	1046.448	70.5229	0.063
		60	33	0.017	1.145	0.58	0.51	0.09	1.05969	25712.22	2423600	1037.028	68.8243	0.064
		70	34	0.019	1.882	0.66	0.51	0.08	1.02880	24962.92	2421200	1040.796	67.2150	0.066
3.0	5.92	40	30	0.023	1.417	0.6	0.56	0.22	1.12737	24026.40	2430700	1048.332	65.1900	0.045
		50	34	0.026	4.053	0.52	0.43	0.19	1.09248	23282.90	2421200	1053.984	63.5711	0.048
		60	33	0.017	1.093	0.53	0.49	0.16	1.05969	22584.03	2423600	1037.028	62.0399	0.052
		70	34	0.019	0.838	0.56	0.52	0.1	1.02880	21925.89	2421200	1040.796	60.5893	0.054
	6.74	40	28	0.017	3.713	0.7	0.63	0.23	1.12737	27354.39	2435400	1037.028	72.3189	0.049
		50	31	0.022	2.052	0.61	0.55	0.19	1.09248	26507.89	2428300	1046.448	70.5229	0.053
		60	34	0.023	2.807	0.68	0.57	0.15	1.05969	25712.22	2421200	1048.332	68.8243	0.055
		70	35	0.03	3.296	0.67	0.5	0.10	1.02880	24962.92	2418800	1061.520	67.2150	0.055



## **6.0 DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADOR AL NIVEL DE PLANTA PILOTO.**

### **6.1 GENERALIDADES**

El equipo construido se diseñó como un escalamiento del secador al nivel de laboratorio, utilizando para ello principios de transferencia de masa y calor. Para que el uso del equipo sea efectivo y se obtengan resultados fehacientes, se debe manejar con el auxilio de los manuales de operación y mantenimiento.

El sistema diseñado y construido consta de resistencias eléctricas como fuente de calor, colocadas transversalmente al flujo de aire, manejadas por medio de un regulador de temperatura. Para mantener un flujo de aire uniforme, se coloca un motor eléctrico el cual acciona unas aspas de aluminio, y el aire pasa a través de las resistencias eléctricas calentándose; pasando este por las bandejas y dándose el fenómeno de secado. Un porcentaje del aire es purgado por medio de una compuerta de movimiento longitudinal y la alimentación del aire se logra por medio de una ventana de celosías de aluminio.

Como ya se mencionó la alimentación fresca de aire se logra por medio de una ventana de celosías de aluminio, con abertura regulable con el propósito de obtener la cantidad de aire necesaria situada en la parte inferior de la carcaza, y el aire agotado se purga por medio de una compuerta de movimiento longitudinal situada en la parte superior de la carcaza.

La carcaza está soportada en una estructura de tubos de hierro, con un sistema de transporte por medio de rodos, que facilitan su movilización.

A continuación se describen los aspectos ingeniérriles de construcción y funcionamiento del equipo.

## 6.2 SISTEMA DE SOPORTE Y CARCAZA.

La carcaza del equipo consiste en una pieza rectangular tridimensional de lámina de hierro negra de 76 cm de alto, 101 cm de ancho y 49.5 cm de espesor. La lámina es de 1/8 plg de espesor, revestida con una capa de pintura anticorrosiva resistente a medianas temperaturas, evitándose con esto el deterioro por la corrosión y el calor, como se muestra en la figura 6.1.

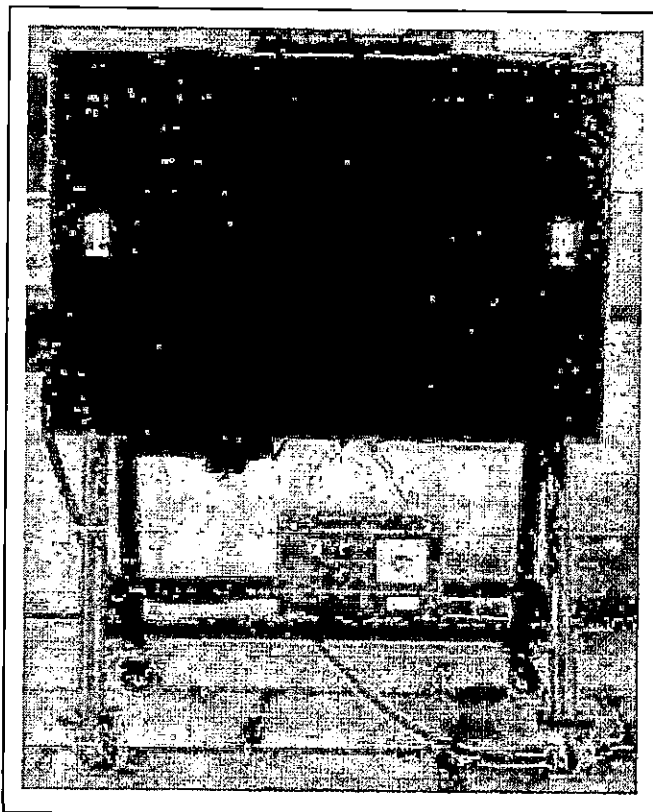


Fig 6.1. Secador de bandejas al nivel de planta piloto.

El ensamblado de las láminas se realizó por medio de soldadura eléctrica con electrodos MT-12. Para mantener la forma del equipo, las láminas están montadas en una estructura de ángulo de hierro de 1 ¼ plg de lado por 1/8 plg de espesor. En las esquinas interiores de la carcaza están colocados deflectores, cuya función es direccionar el flujo de aire.

Además consta de dos compuertas móviles en la parte frontal, la compuerta frontal superior es movable, por medio de un sistema de bisagras y la compuerta frontal inferior es desmontable por medio de una serie de tornillos.

El sistema de soporte esta fabricada de tubería de hierro de 2.5 plg de diámetro, reforzados por medio de un rectángulo de ángulo de hierro, proporcionándole el sistema de soporte una altura del suelo a la parte inferior de la carcaza de 72 cm.

Para el transporte del secador, en cada una de las bases de los tubos están colocados rodos los cuales le permiten su movilización con mucha facilidad.

En el anexo VII se detalla el diseño de ingeniería utilizado en su construcción, mostrándose diagramas de la vista frontal, superior y lateral.

### 6.3 SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DEL FLUJO DE AIRE.

El sistema que genera el flujo de aire consta de un ventilador de aspas axiales accionadas por un motor eléctrico. Conectados estos por medio de un eje de transmisión. Las aspas axiales se presentan en la figura 6.2.

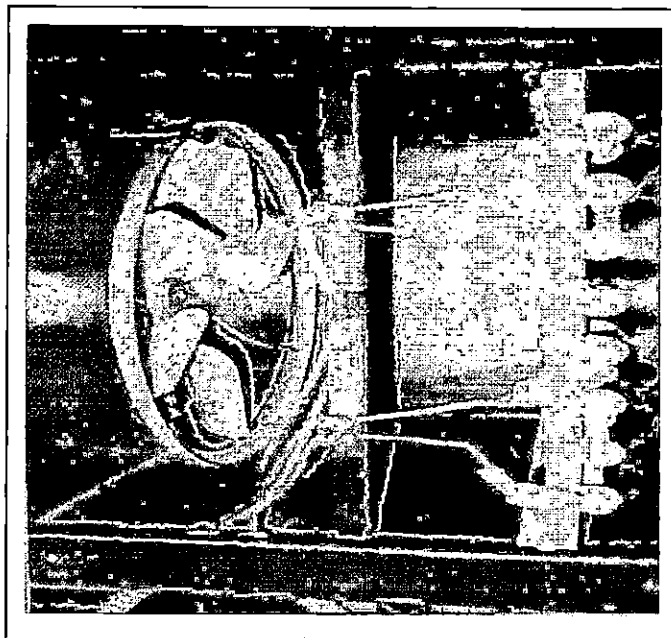


Fig. 6.2. Aspas axiales de aluminio

El motor eléctrico posee las siguientes especificaciones:

Voltaje = 110 volt

Potencia = 1/3 Hp

RPM = 1080

La transmisión de movimiento del motor hacia las aspas se logra por medio de un eje de hierro, para evitar las vibraciones se coloca una chumacera (soporte que posee un balero en su interior) en el eje en la parte anterior a las aspas; para asegurarse que las aspas utilicen eficientemente el aire absorbido se coloca un embudo alrededor de estas. Ver figura 6.3.

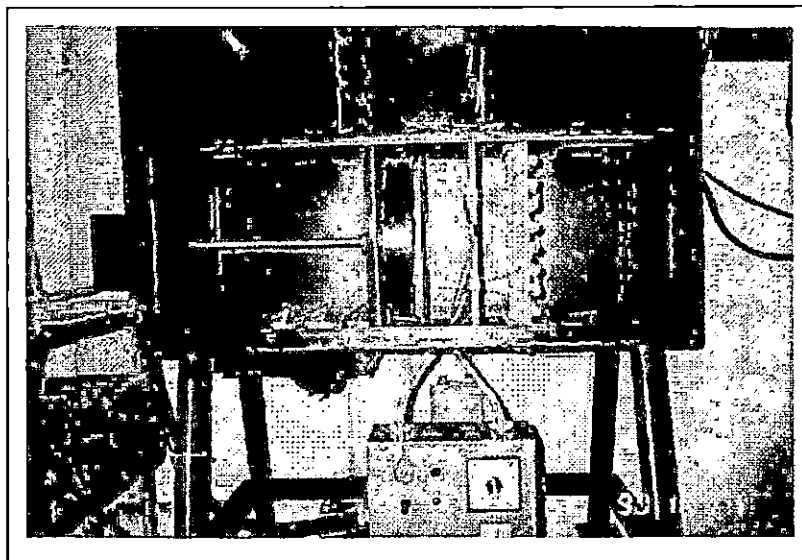


Fig. 6.3. Sistema de control y generación del flujo de aire.

El control del motor eléctrico está colocado en el panel, el cual es compartido con el control de temperatura. Para lograr el arranque del motor se utiliza un dispositivo denominado capacitor.

En la parte inferior del secador se encuentra una ventana de celosías de aluminio, la abertura de estas celosías es regulable, por medio de esta ventana de abertura regulable se proporciona la cantidad de aire fresco necesaria para el secado, observado en la figura 6.4.

En la parte superior del secador está colocado una compuerta de movimiento longitudinal, como se muestra en la figura 6.5, que posee una abertura regulable, por medio de esta se purga un porcentaje del aire y el restante se recicla.

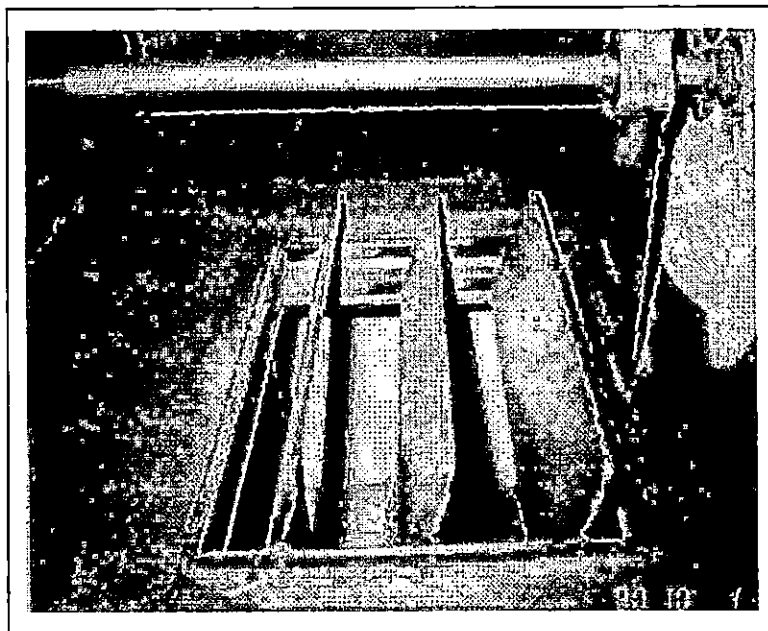


Fig. 6.4. Compuerta de alimentación de celosías de aluminio.

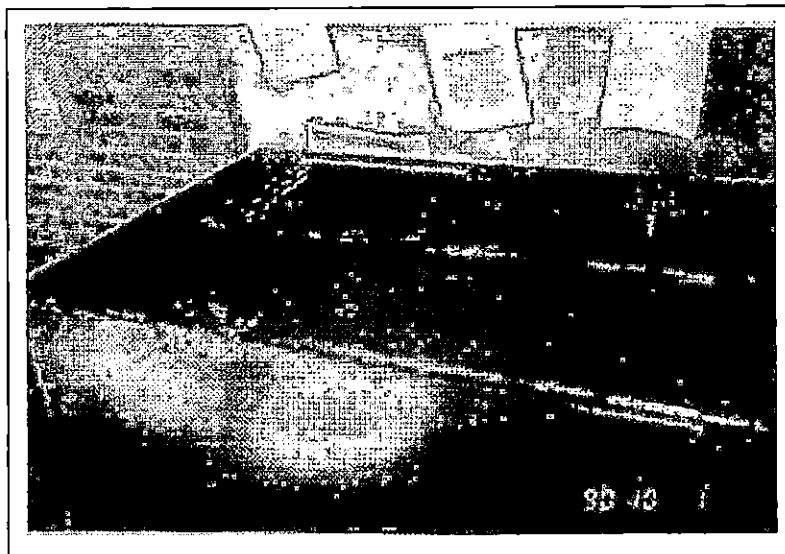


Fig. 6.5. Compuerta de movimiento longitudinal

#### 6.4 SISTEMA DE GENERACION Y CONTROL DE CALOR

El sistema de calentamiento consta de dos resistencias de 2750 watt de potencia cada una, trabajando a un voltaje de 220 volt. La intensidad calorífica se controla por medio de un regulador de temperatura marca REX, con un intervalo de trabajo de 0 a 400 °C, mostrado este regulador en la figura 6.6. Unido a este regulador se encuentra un dispositivo llamado contactor, el cual tiene la función de permitir el paso del flujo de corriente a las resistencias, protegiendo a la vez al regulador de cualquier cambio drástico de voltaje.

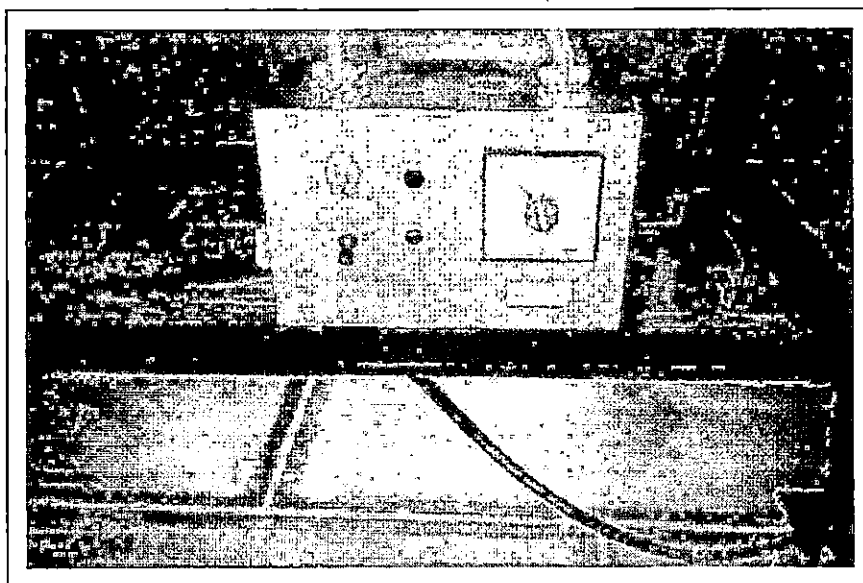


Fig.6.6. Panel de control, conteniendo el regulador de temperatura.

Para poder mantener el flujo de aire a una temperatura constante, se coloca en el camino del aire caliente una termocupla, cuando la temperatura del aire baja la termocupla lo detecta y manda una señal al regulador de temperatura para que este permita fluir la intensidad de corriente necesaria hacia las resistencias y así mantener una temperatura uniforme del aire.

Las conexiones entre el regulador de temperatura y las resistencias, esta hecha con alambre de silicón N°10, debido a que este resiste altas temperaturas, eliminándose el deterioro por calor.

Las resistencias están colocadas de tal forma que, al pasar el aire a través de estas se incrementa el calor sensible del aire. La forma geométrica en que están dispuestas las resistencias se presenta en la figura 6.7. Para que el calor de las resistencias no sea transmitido al secador las resistencias están aisladas por medio de un material refractario en forma de tubitos llamado chinás.

Para poder tener un mayor control del equipo en funcionamiento, en el panel de control se ubican dos pilotos (focos) de diferente color. El piloto de color rojo indica que existe un flujo de corriente hacia las resistencias y el verde cuando no hay flujo.

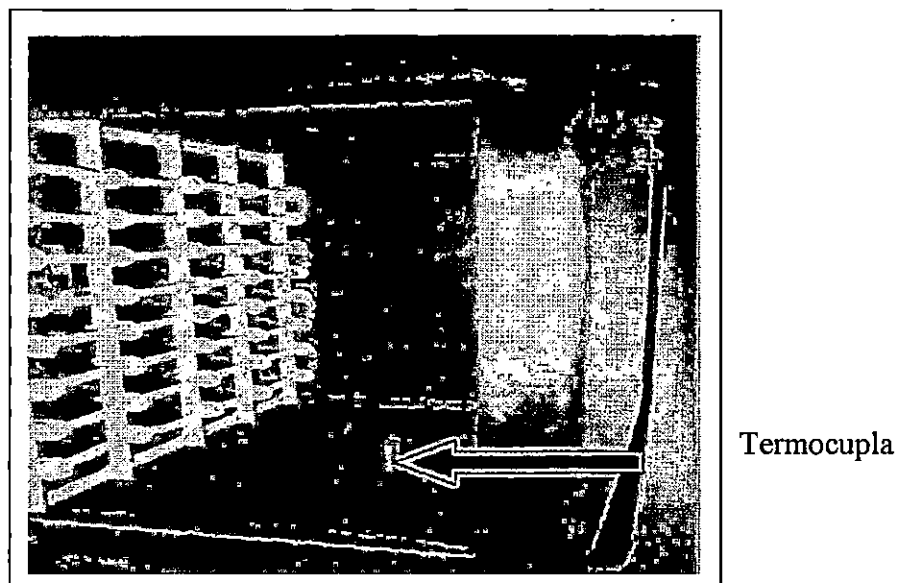
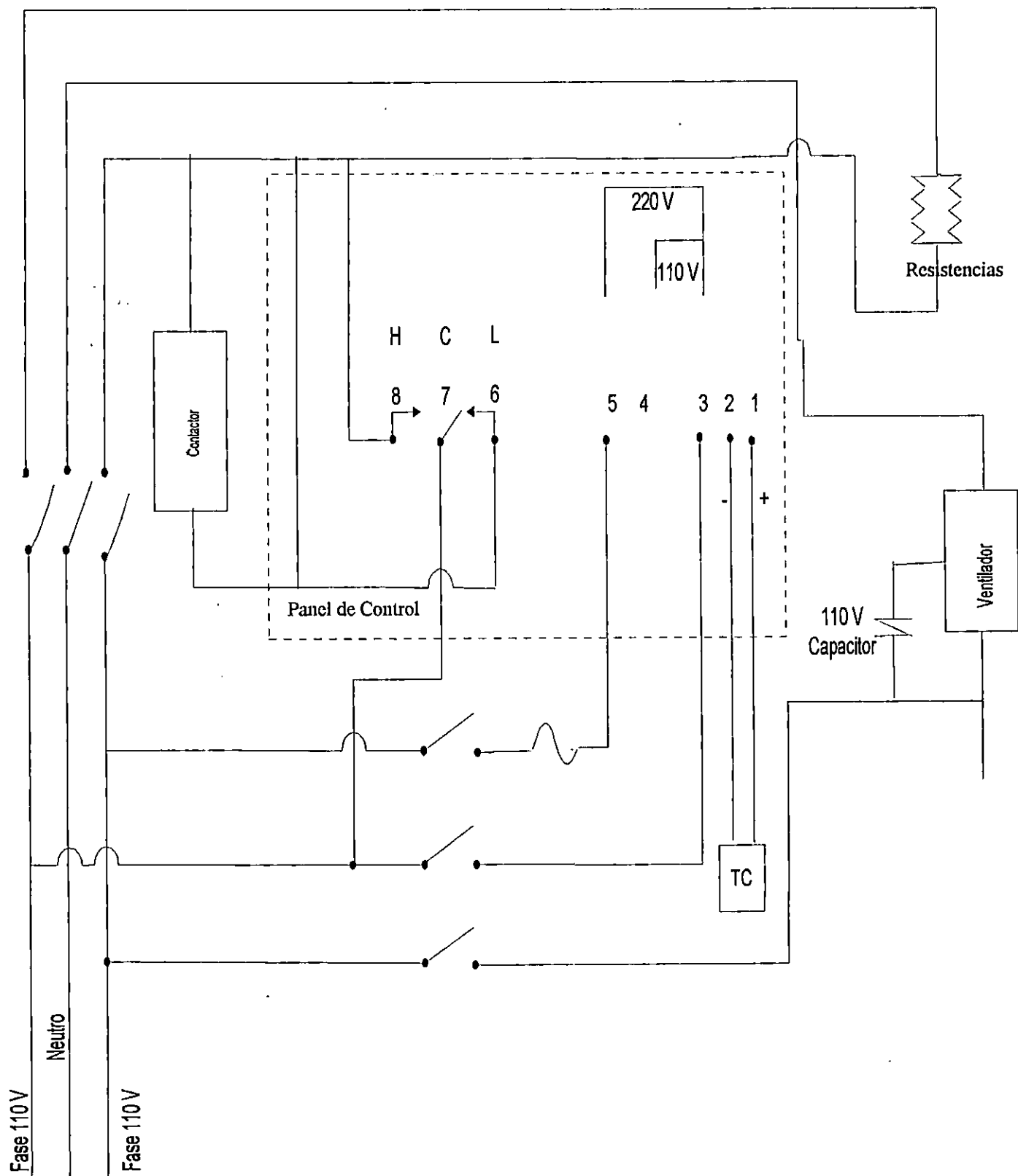


Fig. 6.7. Panel de resistencias y termocupla.

Para obtener una mayor comprensión, de cómo están enlazados todos los equipos ver el diagrama eléctrico en la figura 6.8.





220 V (AC)

Fig. 6.8. Diagrama eléctrico del secador al nivel piloto.

## 6.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE BANDEJAS.

Para el secador al nivel de planta piloto se fabricaron tres series de bandejas, compuesta cada serie por tres bandejas. Las dimensiones se describen a continuación en el cuadro 6.1

Cuadro 6.1. Dimensiones de las series de bandejas.

Altura (cm)	Cantidad	Ancho (cm)	Largo (cm)
1.5	3	23	30
2.0	3	23	30
3.0	3	23	30

El calculo del espaciado entre bandejas se realizó por medio de una deducción matemática presentado den la sección 5.5.

Las bandejas están fabricadas de lamina de hierro negra de 3/64 plg de espesor, revestidas con pintura anticorrosiva resistente a medianas temperaturas, como se observa en la figura 6.9. El aire caliente pasa transversalmente por estas dándose el fenómeno de la transferencia de calor del aire hacia el materia sometido a secado y la transferencia de masa del material sometido a secado al aire.

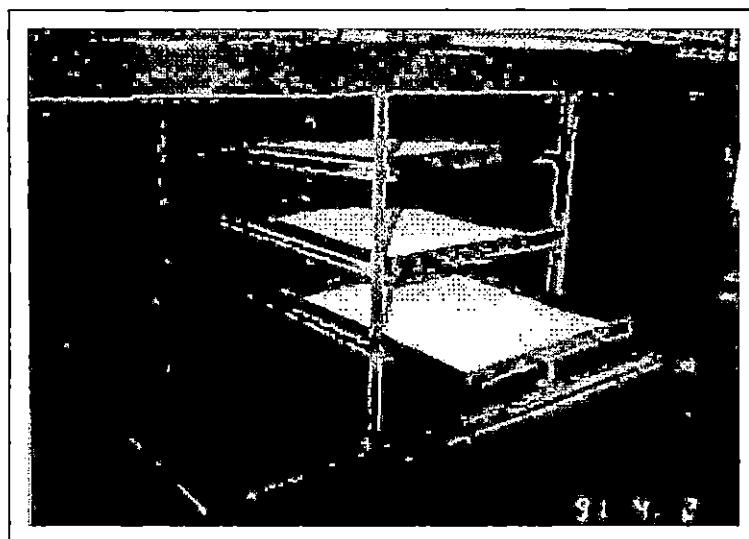


Fig. 6.9. Disposición de las bandejas en el secador al nivel de planta piloto, conteniendo silica gel.

## 7.0 MANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

### 7.1 MANUAL DE OPERACIÓN DEL SECADOR AL NIVEL DE LABORATORIO

Para que los resultados en las prácticas de laboratorio sean los óptimos, se deben de seguir paso a paso las indicaciones en el manual de operación.

#### Procedimiento.

- a) Asegurarse que el equipo y los accesorios (bandejas, balanza granataria y termómetros) estén completamente limpios, verificando en buen estado de las resistencias, los termostatos y el ventilador; con la fuente de energía desconectada.
- b) Instalar los accesorios del equipo de acuerdo a la figura 4.2. Es decir, el sistema de medición de peso y temperatura.
- c) Conectar la fuente de energía y accionar el ventilador, a la velocidad deseada ( $v_1= 5.92$  ó  $v_2= 6.74$  m/s).
- d) Escoger la combinación de los niveles de temperatura adecuados, para obtener la temperatura deseada; logrando lo anterior por medio del ajuste de los termostatos, según lo indicado mas adelante en la sub- sección 7.1.1.
- e) Esperar que el sistema se estabilice, esto significa que la combinación de los termostatos mantenga la temperatura de trabajo y el flujo de aire se mantenga en la velocidad deseada.
- f) Colocar la bandeja a utilizar con el material sometido a secado, corroborando que este perfectamente suspendida y transversal al flujo de aire.
- g) Tomar el peso inicial de la muestra al tiempo cero.
- h) Comenzar a monitorear a intervalos de tiempo prefijados, los siguientes parámetros:
  - Pérdida de peso.
  - Tiempo.

- Temperatura de bulbo seco a la entrada y a la salida de la bandeja.
  - Temperatura de bulbo húmedo a la entrada y a la salida de la bandeja.
- i) Finalizar el monitoreo cuando la pérdida de peso no es apreciable.
  - j) Retirar la muestra y llevarla a la estufa, durante un intervalo de tiempo prudencial ; con el objetivo de obtener el peso de sólido seco.
  - k) Apagar el sistema de generación de calor, dejando encendido el ventilador hasta que el equipo se enfríe.
  - l) Apagar el ventilador y desconectar el equipo. Procediendo posteriormente a la limpieza minuciosa del mismo.

#### 7.1.1 CALIBRACION DEL SECADOR DE BANDEJAS AL NIVEL DE LABORATORIO.

La calibración del equipo consiste en encontrar la capacidad de funcionamiento, esto significa hacer funcionar el equipo desde el menor hasta el mayor nivel, con el fin de tener un estimado del rango de temperaturas y velocidades a las cuales se pueden realizar las pruebas de laboratorio.

A continuación se presenta un cuadro con las diferentes combinaciones de temperatura y velocidad, que se pueden realizar en el Secador de Bandejas. Estas combinaciones se pueden lograr por medio de la manipulación de tres termostatos y el control de velocidad del ventilador.

Los termostatos constan de los siguientes niveles: Lo, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y Hi, el ventilador tiene cuatro velocidades (I, II, III y IV), al combinar las escalas de los termostatos entre ellos y las diferentes velocidades del ventilador, obtenemos las temperaturas alcanzadas a cada nivel. Los siguientes cuadros nos presentan la combinación de los termostatos, la velocidad del ventilador, la temperatura de entrada del aire a la bandeja y la temperatura de

salida del aire, las pruebas de calibración se realizaron con las bandejas vacías, es decir, sin ninguna carga de material secándose.

Las pruebas se realizaron solo utilizando las dos velocidades mas bajas del ventilador, debido a que se necesita que el aire caliente logre un íntimo contacto con el material sometido a secado. Mientras que las velocidades III y IV no son adecuadas (son mayores de 10 m/s), obligando a que el aire caliente sea removido muy rápido y no logrando obtenerse el tiempo de contacto necesario. Con respecto a los termostatos las pruebas se realizaron con los siguientes niveles: Lo, 2, 4, 6 y Hi, debido a que en los niveles intermedios no llevaba consigo un cambio apreciable.

**Cuadro 7.1.** Termostato 1 con nivel de velocidad I (5.92 m/s).

Nivel de Termostato1	Tbs1 (°C)	Tbs2 (°C)
Lo	30.0	30.0
2	32.5	30.0
4	36.0	34.0
6	40.0	37.0
Hi	40.5	26.0

**Cuadro 7.2.** Termostato1 y 2 con nivel de velocidad I (5.92 m/s).

Nivel de Termostato. 1	Nivel de Termostato 2	Tbs1 (°C)	Tbs2 (°C)
Lo	Lo	34.0	32.0
	2	35.5	34.0
	4	37.0	35.0
	6	39.5	37.0
	Hi	44.5	41.5
2	Lo	36.0	34.0
	2	37.5	35.0
	4	40.0	37.0
	6	42.5	39.0
	Hi	48	43.0
4	Lo	37.5	36.0
	2	39.0	36.5
	4	41.0	38.0
	6	44.0	40.0
	Hi	46.5	42.0

6	Lo	41.0	38.0
	2	41.5	39.0
	4	45.0	40.5
	6	47.5	42.5
	Hi	52.5	46.0
	Lo	44.0	40.5
Hi	2	46.0	42.0
	4	48.5	44.0
	6	51.5	46.0
	Hi	58.0	51.0

Cuadro 7.3. Termostato 1, 2 y 3 con nivel de velocidad 1 (5.92 m/s).

Nivel de Termostato 1	Nivel de Termostato 2	Nivel Termostato 3	Tbs1 (°C)	Tbs2 (°C)
Lo	Lo	Lo	36.0	34.0
		2	37.5	35.05
		4	39.0	37.0
		6	41.5	38.5
		Hi	44.0	41.0
		Lo	37.0	35.5
2	Lo	2	40.0	37.0
		4	42.0	38.5
		6	44.0	41.0
		Hi	47.0	43.0
		Lo	39.0	36.5
		2	41.0	38.5
4	Lo	4	42.0	39.0
		6	45.5	41.0
		Hi	49.5	44.0
		Lo	44.0	39.5
		2	45.0	40.5
		4	48.0	42.5
6	Lo	6	50.0	44.0
		Hi	52.5	47.0
		Lo	45.5	41.5
		2	48.0	43.5
		4	51.0	45.0
		6	53.0	47.5
Hi	Lo	Hi	56.5	50.0
		Lo	50.5	45.0
		2	52.0	48.5
		4	54.0	50.0
		6	55.5	51.0
		Hi	59.0	52.0

Hi	4	Lo	51.5	46.5
		2	52.0	47.5
		4	54.5	49.0
		6	56.0	50.5
		Hi	59.5	54.0
		Lo	45.0	49.0
Hi	6	2	57.0	50.5
		4	59.5	52.0
		6	62.0	54.5
		Hi	64.0	56.0
		Lo	46.0	53.0
		2	56.0	54.0
Hi	Hi	4	65.0	57.0
		6	68.0	59.0
		Hi	73.0	62.5

Cuadro 7.4. Termostato 1 con nivel de velocidad II (6.74 m/s).

Nivel de Termostato 2	Tbs1 (°C)	Tbs2 (°C)
Lo	34.0	33.0
2	36.0	34.5
4	38.0	31.0
6	41.0	38.0
Hi	44.0	41.0

Cuadro 7.5. Termostato 1 y 2 con nivel de velocidad II (6.74 m/s).

Nivel de Termostato 1	Nivel de Termostato 2	Tbs1 (°C)	Tbs2 (°C)	
Lo	2	32.0	31.0	
	Lo			
	2			32.5
	4			34.0
	6			36.0
	Hi			40.0
2	Lo	33.0	32.0	
	2	34.0	33.0	
	4	36.5	34.0	
	6	40.0	36.5	
	Hi	45.0	40.5	
	Lo	34.5	33.0	
4	2	36.0	34.0	
	4	37.0	35.0	
	6	40.0	37.0	
	Hi	45.0	41.0	

6	Lo	38.5	36.0
	2	39.0	36.5
	4	41.0	38.0
	6	45.0	41.0
	Hi	49.0	43.5
	Lo	40.5	38.0
Hi	2	42.5	39.0
	4	44.5	41.0
	6	47.5	42.5
	Hi	50.0	45.0

Cuadro 7.6. Termostatos I, 2 y 3 con nivel de velocidad II (6.74 m/s).

Nivel de Termostato 1	Nivel de Termostato 2	Nivel de Termostato 3	Tbs1 (°C)	Tbs2 (°C)
Lo	Lo	Lo	35.0	33.0
		2	36.0	34.0
		4	37.0	35.0
		6	39.5	37.0
		Hi	41.5	39.0
		Lo	36.5	35.0
2	Lo	2	38.5	35.5
		4	40.0	37.0
		6	42.0	39.0
		Hi	45.0	41.0
		Lo	38.0	36.0
		2	38.5	36.5
4	Lo	4	40.5	37.5
		6	42.0	39.5
		Hi	45.0	42.0
		Lo	41.0	38.0
		2	42.0	38.5
		4	45.0	41.0
6	Lo	6	46.5	42.5
		Hi	49.0	44.5
		Lo	43.0	40.0
		2	45.5	42.0
		4	47.5	43.0
		6	50.0	45.0
Hi	Lo	Hi	53.0	47.5



HI	2	Lo	48.0	43.0
		2	48.5	44.0
		4	50.5	46.0
HI	4	6	53.0	47.0
		Hi	54.0	49.0
		Lo	49.0	45.0
		2	50.0	45.5
		4	52.0	46.0
		6	55.0	49.0
HI	6	Hi	57.0	51.0
		Lo	54.0	48.0
		2	55.0	49.0
		4	57.0	51.0
		6	58.0	52.0
HI	Hi	Hi	60.0	54.0
		Lo	57.5	51.0
		2	59.5	52.0
		4	61.0	54.0
HI	Hi	6	63.0	55.5
		Hi	65.5	57.5

## **7.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL SECADOR AL NIVEL DE LABORATORIO**

Para el buen funcionamiento de los equipos en general se hace necesario un programa de mantenimiento periódico. El mantenimiento se divide en dos tipos: mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo depende del usuario y consiste en la limpieza y revisión minuciosa. El mantenimiento correctivo se debe de realizar con el auxilio de un técnico especialista en la materia.

A continuación se describen los manuales de mantenimiento preventivo y correctivo del secador al nivel de laboratorio:

### **7.2.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO.**

- a) Limpiar el secador y las bandejas periódicamente
- b) Revisión de las resistencias eléctricas cada 500 horas de trabajo, removiendo cualquier tipo de contaminante; evitándose un corto circuito.
- c) Revisar las terminales del control de temperatura y interruptor, asegurándose de su buen estado.
- d) Cuantificar el consumo de corriente eléctrica periódicamente, con el objetivo de evaluar si los componentes eléctricos están funcionando correctamente.
- e) Desmontar el panel de control y verificar el buen estado de las conexiones.
- f) Asegurarse que los ensamblajes mecánicos no hayan sufrido deterioro antes de comenzar a monitorear.

### 7.2.2 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

- a) Al activar el equipo y detectar cualquier mal funcionamiento de los sistemas de generación de calor y flujo de aire, apagarlo y desconectarlo inmediatamente, procediendo a buscar un técnico electricista.
- b) Evaluar periódicamente las uniones y los efectos de la corrosión en la carcasa, el soporte y las bandejas, dictaminado si es necesario repararlas, contruir las o si todavía son funcionales.
- c) Después de seis meses examinar el recubrimiento anticorrosivo de la carcasa y el soporte y dictaminar si es necesario recubrirlo de nuevo.

### 7.3 MANUAL DE OPERACIÓN DEL SECADOR AL NIVEL DE PLANTA PILOTO.

La operación del secador al nivel de planta piloto requiere de mayor cuidado que el secador al nivel de laboratorio, por lo que debe de existir mayor supervisión del instructor. A continuación se describe el procedimiento de operación.

- a) Asegúrese que el equipo este completamente limpio, así como los accesorios.
- b) Por medio de una inspección visual verificar el buen estado de las resistencias, eje de transmisión, chumacera, motor eléctrico, compuertas y conexiones. Con la fuente de energía desconectada.
- c) Conecte la fuente de energía y accionar el ventilador
- d) Conectar las resistencias y hacer llegar al aire a la temperatura de trabajo, por medio de cambios graduales, con aumentos de 20 °C. Esperando que el sistema se estabilice después de cada cambio.
- e) Con el sistema estabilizado y la temperatura de trabajo imperando, se procede a introducir las bandejas llenas con el material sometido a secado.
- f) El tiempo de secado se ha predeterminado anteriormente, por medio de las curvas de velocidad de secado a las condiciones predominantes. Al cumplirse este plazo se procede a abrir la compuerta superior frontal y por medio de una inspección visual asegurarse de que el material sometido a secado reúna las condiciones deseadas.
- g) Con el equipo de seguridad industrial necesario proceder a: retirar la o las bandejas del secador y proceder con el desarrollo de la practica de laboratorio.
- h) Ya concluido el proceso de secado proceder a desconectar las resistencias, colocando en 0°C el indicador del regulador de temperatura, dejando funcionando el ventilador hasta que el equipo se enfríe.
- i) Cuando el equipo ha alcanzado la temperatura ambiente se precede a desconectar el ventilador y posteriormente la fuente de energía.

- j) El último paso es la limpieza del equipo, consistiendo en: lavar las bandejas después de desalojar el material secado y limpiar el interior de la carcasa; asegurándose que no queden residuos de producto combinado con agua en las esquinas.

## **7.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL SECADOR AL NIVEL DE PLANTA PILOTO.**

El secador al nivel de planta piloto posee accesorios de mejor tecnología, en analogía con el secador al nivel de laboratorio. Por lo tanto requiere mayor esmero y tiempo en su mantenimiento. A continuación se detallan los manuales de mantenimiento preventivo y correctivo.

### **7.4.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO.**

- a) Limpiar las bandejas y el equipo al inicio y al final de su uso, así como en los períodos de tiempo que no es utilizado.
- b) Revisar y evaluar las resistencias, las terminales del control de temperatura y flujo de aire, cada 250nn horas de trabajo.
- c) El regulador de temperatura debe de hacerse llegar a la temperatura de trabajo por medio de cambios graduales, prolongándose la vida útil de los componentes eléctricos.

### **7.4.2 MANTENIMIENTO CORRECTIVO.**

- a) Los materiales utilizados en la construcción del equipo y las bandejas, pueden sufrir deterioro debido a la corrosión. Se recomienda al detectar un deterioro corregirlo, esta corrección puede consistir en reparar o en caso extremo construir de nuevo la parte afectada.
- b) El panel de control en su interior contiene una serie de componentes eléctricos, que para su evaluación se necesita el diagnóstico de un técnico electricista.
- c) Al sufrir el equipo sobrevoltaje, debe de bajarse los dados de la caja térmica y luego desconectarse de la fuente de energía. Acudir a un técnico especialista en el campo para que realice su evaluación.

d) El eje de transmisión debe de girar sin esfuerzo sobre su eje de simetría, al no efectuarse así se debe de evaluar los siguientes aspectos y seguir la recomendación planteada::

- Chumacera: al encontrarle falla debe de ser reemplazada.
- Motor eléctrico: debe de ser revisado por un técnico electricista.
- Eje de transmisión: podría torcerse o romperse, se recomienda su reemplazo.
- Aspas axiales: Podrían torcerse o quebrarse, se recomienda su reemplazo.

## CONCLUSIONES

La construcción de los secadores se realizó con fines eminentemente didácticos, lo cual contribuirá a la enseñanza teórica-práctica de las operaciones unitarias, específicamente las de secado.

El secador construido al nivel de laboratorio, permitirá obtener los parámetros de secado para otros tipos de sustancias y sustentar así, futuras investigaciones de estas que pueden ser sujetas a agroindustrializarse.

Con la construcción de los secadores al nivel de laboratorio y piloto, se contribuye al desarrollo de aprendizaje - enseñanza de las asignaturas: Balance de materia y energía, operaciones unitarias III. Esto puede concretizarse por medio de guías de laboratorio.

La base del diseño del secador al nivel de planta piloto fue la silica gel, debido a que es un material idóneo para secar y por su capacidad de absorber humedad, realizándose énfasis e los parámetros obtenidos de esta sustancia, los cuales son corroborados por los fundamentos de secado de la sección 2.0.

Para el escalamiento del secador al nivel piloto, se simuló las mismas condiciones utilizadas en laboratorio, es decir se mantuvieron los niveles de operación seleccionados de temperatura, velocidad de flujo de aire y espesores de bandejas, de los cuales se estimó el espaciado del sistema de 3 bandejas en arreglo paralelo al nivel piloto, obteniéndose los valores de 6.5 cm cuando se utiliza el espesor (H) de 1.5 cm; 6.0 cm para H=2.0cm y 5.0 cm de espaciado para H= 3.0 cm; por lo que estos valores concuerdan con el espaciado recomendado para secadores de bandeja comerciales, cuyo espaciado debe ser mayor de 4 cm.



La sílica gel en su período decreciente, denota que prevalecen las fuerzas capilares, observándose linealidad en la curva de velocidad de secado; mientras que en la cebolla prevalecen tanto las fuerzas capilares, como el mecanismo de difusión interno, observándose una ligera concavidad en la curva de velocidad de secado.

Los parámetros para el diseño del secador al nivel de planta piloto, se escalaron de los resultados de las pruebas de laboratorio, utilizando para este fin las herramientas adquiridas en las asignaturas de operaciones unitarias.

Con equipos como la cámara humedad relativa del CDIECAP, se contribuye enormemente a la obtención de datos de equilibrio de las sustancias con el medio ambiente; siendo una parte crítica de las operaciones de secado.

De acuerdo a los valores de humedades de equilibrio obtenidos en la cámara de humedad relativa, estos disminuyen al aumentar la temperatura a una humedad relativa dada; reafirmando los principios sobre humedad de equilibrio propuestos en la sección 2.2.1.

Por ser la sílica gel un material inorgánico, poroso y granular, le proporciona la facultad de que los diagramas de equilibrio pueden extrapolarse desde su origen, fundamentado este tratamiento en que la humedad de equilibrio es cero cuando su humedad relativa también es cero.

Debido a que las variables involucradas en el proceso son conocidas, la experimentación no necesita un diseño experimental; por lo que se realizó un modelado empírico que reproduce matemáticamente el fenómeno de secado.

El modelado empírico del cilantro nos ofrece un coeficiente de correlación de 0.76 ( $r^2$ ), observándose que este valor no se ajusta a ningún modelado matemático existente. Una de las razones más significativas de la forma de la curva de  $X$  vs  $\theta$  de la fig 5.6, se debe a que el cilantro por ser un material de baja densidad, la cantidad de materia depositada en la

bandeja para iniciar el proceso de secado era insuficiente, por lo que las variaciones en la pérdida de peso no fueron detectadas por el sistema de pesado, que también se vio afectado por el desprendimiento de aceites orgánicos acumulados en las bandejas, obteniendo valores de humedad erróneas.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda futuras investigaciones del secado de yerba buena y ajo, debido a que su alto contenido de agua permite su estudio, aunado esto a que al combinarse con la cebolla y cilantro, se obtiene como resultado especies vegetales (condimentos) que podrían ser explotados como valor agregado y así contribuir al mantenimiento del equipo.

Al efectuar la investigación de sustancia orgánicas alimenticias de baja densidad (ejemplo: yerba buena y ajo) se recomienda que: se cuantifique la pérdida de peso en periodos de tiempo y cantidades de materia prima relativamente grandes.

La obtención de las velocidades de evaporación ( $N$ ), se debe a la exactitud del calculo del cambio de la variación de humedad con respecto al tiempo ( $dX/d\theta$ ). Por lo que se recomienda adquirir buenas bases matemáticas y computacionales para un mejor resultados de estos.

Se recomienda que futuras investigaciones en el secador al nivel de laboratorio y planta piloto, se realicen el aislamiento de los mismos, con el objetivo de obtener una mayor eficiencia energética y contribuir con la enseñanza práctica en las operaciones de transferencia de calor.

El mantenimiento preventivo de los secadores se debe realizar periódicamente, aunque este no haya sido utilizado. Este mantenimiento se refiere a brindarle una limpieza minuciosa; para disminuir este efecto es recomendable fabricarle a los secadores cobertores de plástico u otro material que limite el contacto de estos con el medio ambiente.

A lo largo de los manuales de mantenimiento correctivos de los secadores, se encuentra una recomendación muy importante, la cual nos dice que cualquier inspección o reparación de los componentes eléctricos, debe de ser realizado por medio de un técnico electricista.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Badger, W,L, Banchemo,J.T. **“Introducción a la Ingeniería Química”**, Primera Edición, Editorial Mc Graw Hill, Argentina, 1970.
2. Chemical Engineering Progress, (CEP), **“Selection of Industrial and Dryers”**, Revista Mensual de Marzo 5 de 1984.
3. Desrosier, M. **“Química de los Alimentos”**; Cuarta Edición, Compañía continental S.A de C.V, 1991.
4. Felder, R.M, Rousseau, R.W. **“Principios Elementales de los Procesos Químicos”**, Segunda Edición, Editorial Addison Wesley Iberoamericana, E.U.A, 1991.
5. Fiedman y Muller, **“Proceeding of the general Discussion on Heat Transfer”**; Institution de Mechanical Engineering, London; and American Society of Mechanical, New York, 1951.
6. Foust, A.S. **“Principios de Operaciones Unitarias”**; Tercera Edición, Compañía Editorial Continental S.A (CECSA), México, 1987.
7. Fundación Salvadoreña para el desarrollo Económico Social para la cebolla y Ajo (FUSAGRI), **“Guía del agricultor para el cultivo de la cebolla”**. Plan divulgación, 1975.
8. Geankoplis, Christie. **“Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”**; Segunda impresión, Compañía Editorial Continental S.A de C.V, 1996.

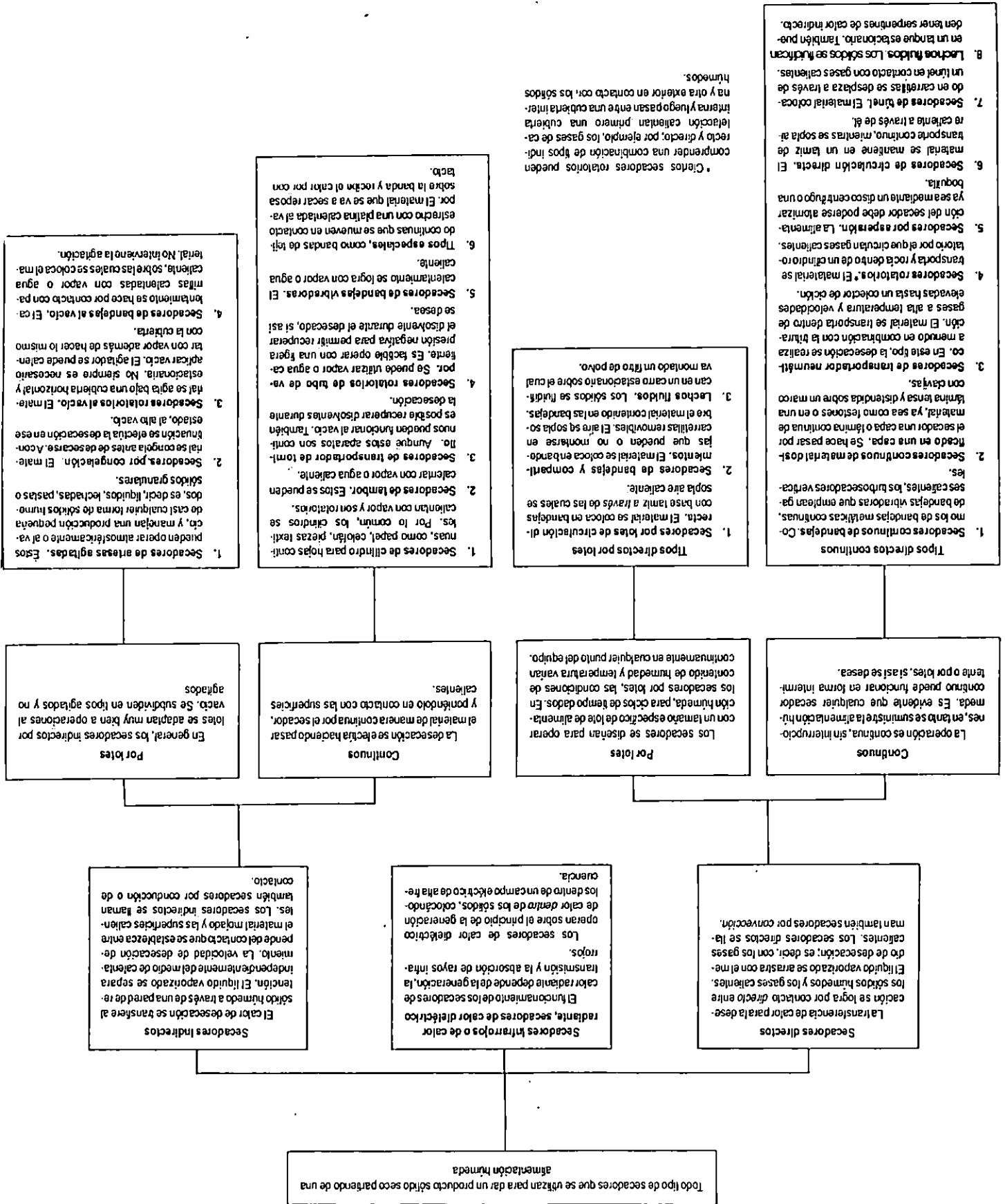
9. Gessner, G. Hawley van Nustrand, **"The Condensed Chemical Dictionary"**, 25<sup>TH</sup> edition, Reinhold Company. USA. 1981.
10. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, **"Tabla de composiciones de alimentos, para uso en América latina"**. Ciudad de Guatemala. C.A. Junio 1951.
11. Lee, D.A. **"American Ceramic Society"**, Revista Anual 1976.
12. Lindblad, C. Druden, L. **"Almacenamiento de grano manejo, secado, silos, control de insectos y roedores"**; Primera impresión, Editorial PAX, México, 1981.
13. Montaldo, Alvaro.; **"Cultivo de Raices y Tuberculos Tropicales"**. Enero de 1981.
14. Perry, Robert. **"Manual del Ingeniero Químico"**; Sexta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 1994.
15. Quiñones, Roberto. **"Evaluación de 3 Niveles de Fertilización Nitrogenada en 4 Cultivares de Cebolla (Allium Cepa L.) Bajo Condiciones de Riego en el valle de San Andrés. La Libertad. El Salvador"**. MAG, ENA, Trabajo de Graduacion. Agosto de 1995.
16. Ramírez, M. Genel, S. **"Almacenamiento y conservación de Granos y Semillas"**; Tercera impresión. Compañía Continental, S.A de C.V, México, 1975.
17. Reyes, Milady Elba, **"Resumen de estudio Coriamdun Sativum"**. UES.1980.
18. Schurr, Well., **"Drying Phenomena"**; artículo publicado en la revista técnica Ind. Chemical Engineering; pag 51, 1958.

19. Shepherd, Brewer y Hadlock, **“Drying Transfers of Mass Calculation”**  
artículo publicado por American Institute Chemical (AICHE), 1938.
20. Tiscorna, J.; **“Cultivo de Hortalizas Terrestres: Bulbos, Raíces”**. Julio de 1975.
21. Treybal, Robert. **“Operaciones de Transferencia de Masa”**; Segunda Edición,  
Editorial Mc Graw Hill, México, 1988.
22. Van Arsdel, W. Copley, M. **“Food Dehydration, Drying Methods and Phenomena”**, Volume N°1. 2<sup>da</sup> Edición. The Avi Publishing Company. Westport, Connecticut. 1973

# ANEXOS



Cuadro I.1. Clasificación de secadores basada en la Transferencia de Calor. (Perry, 1994)



Cuadro I.2. Clasificación de Secadores Comerciales basados en el manejo de materiales húmedos. (Perry, 1994)

	Líquidos	Lechadas	Pastas y lodos	Polvos de movimiento libre	Sólidos granulares, cristalinos o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
Tipo de secador	Soluciones verdaderas y coloidales: emulsiones. Ejemplos: soluciones de sales inorgánicas, extractos, leche, sangre, licores de desecho, látex de caucho, etc.	Suspensiones bombeables. Ejemplos: lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, suspensión fluxa de arcilla, concentrados de plomo, etc.	Ejemplos: tortas de prensa de filtrar, lodos de sedimentación, sólidos centrifugados, almidón, etc.	Malla de tamiz 100 o menores. De movimiento relativamente libre en estado húmedo. Polvorientos cuando están secos. Ejemplos: precipitados, centrifugados, pigmentos, arcilla, cemento	Mayores que malla 100. Ejemplos: fibras de rayón, cristales de sales, arena, minerales, tiras de papa, hule sintético	Ejemplos: alfarería, ladrillos, tortas de rayón, casquillos de escopeta, sombreros, objetos pintados, madejas de rayón, madera	Ejemplos: papel, telas impregnadas, paños, celofán, láminas de plástico	Ejemplos: chapa de madera, láminas de cartón comprimido, impresiones fotográficas, cuero, lámina de hule espuma
De bandejas y compartimientos. Tipo directo, operación por lotes	No es aplicable	Para una producción por lotes muy pequeña. Desección en laboratorio	Apropiado para operaciones por lotes. A grandes capacidades, los costos de inversión y operación son elevados. Tiempos de desecación prolongados.	La formación de polvo puede constituir un problema. Véanse las observaciones bajo "Pastas y lodos"	Apropiado para operaciones por lotes. A grandes capacidades, los costos de inversión u operación son elevados. Tiempos de desecación prolongados	Véanse las observaciones bajo "Sólidos granulosos"	No es aplicable	Véanse los comentarios bajo "Sólidos granulosos"
Por lotes, de circulación directa Tipo directo, operación por lotes.	No es aplicable	No es aplicable	Apropiado sólo si el material se puede preformar. Adecuado para operaciones por lotes. Tiempos de desecación más cortos que los secadores de bandejas	No es aplicable	Por lo general, no es apropiado para materiales más pequeños que la malla 30. Adecuado a capacidades reducidas y operación por lotes	Útil primordialmente para objetos pequeños	No es aplicable	No es aplicable
De túnel. Continuo, de bandejas. Tipo directo, operación continua	No es aplicable	No es aplicable	Apropiado para producciones a pequeña y gran escala	Véanse las observaciones bajo "Pastas y lodos". El turbosecador vertical es aplicable	Esencialmente a gran escala, desecación semi-continua en bandejas	Apropiado para una amplia variedad de formas y contornos. La operación puede ser continua. Tiene un uso muy difundido	No es aplicable	Apropiado para cuero, láminas de cartón comprimido, chapa de madera
Continuo de circulación directa. Tipo directo, funcionamiento continuo	No es aplicable	Sólo el secador de filtro para cristales es adecuado	Apropiado para materiales que se pueden preformar. Maneja grandes capacidades. El Roto-Louvre requiere la recirculación del producto seco	En general no es aplicable, excepto el Roto-Louvre en ciertos casos	Por lo común, no es aplicable para materiales con tamaños menores que malla 30. El material no se somete a volteo excepto en el secador Roto-Louvre. Este último funciona a temperaturas más elevadas	Apropiado para objetos más pequeños que se pueden cargar unos sobre otros. Se utiliza para transportar materiales a través de zonas calentadas. El Roto-Louvre no es apropiado	No es aplicable	Se requieren diseños especiales. Apropiado para chapa de madera. El Roto-Louvre no es apropiado
Rotatorio directo. Tipo directo, operación continua	Aplicable con recirculación del producto seco	Aplicable con recirculación del producto seco	Apropiado sólo si el producto no se adhiere a las paredes y no forma polvo. Es probable que la recirculación del producto evite su adhesión	Apropiado para la mayoría de los materiales y las capacidades a condición de que la producción de polvo no sea demasiado notable	Apropiado para la mayoría de los materiales y las capacidades. La abrasión de polvo o cristales reduce su utilidad	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
De transportador neumática. Tipo directo, de operación continua	Véanse los comentarios bajo "Lechadas"	Sólo se puede usar si el producto se recircula para hacer manejable la alimentación	En general, requiere la recirculación del producto seco para obtener una alimentación adecuada. Muy apropiado para grandes capacidades. Casi siempre, se necesita desintegración	Apropiado para materiales que se suspenden fácilmente en una corriente de gas y pierden humedad sin mayores problemas. Muy apropiado para grandes capacidades	Apropiado para materiales que se suspenden fácilmente en una corriente de gas. Muy apropiado para grandes capacidades. Puede ser que el producto sufra cierta degradación física	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable



	Líquidos	Lechadas	Pastas y lodos	Polvos de movimiento libre	Sólidos granulares, cristalinos o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
Tipo de secador	Soluciones verdaderas y coloidales: emulsiones. Ejemplos: soluciones de sales inorgánicas, extractos, leche, sangre, licores de desecho, látex de caucho, etc.	Suspensiones bombeables. Ejemplos: lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, suspensión fluida de arcilla, concentrados de plomo, etc.	Ejemplos: tortas de prensa de filtrar, lodos de sedimentación, sólidos centrifugados, almidón, etc.	Malla de tamiz 100 o menores. De movimiento relativamente libre en estado húmedo. Polvorientos cuando están secos. Ejemplos: precipitados, centrifugados, pigmentos, arcilla, cemento	Mayores que malla 100. Ejemplos: fibras de rayón, cristales de sales, arena, minerales, tiras de papa, hule sintético	Ejemplos: alfarería, ladrillos, tortas de rayón, casquillos de escopeta, sombreros, objetos pintados, madejas de rayón, madera	Ejemplos: papel, telas impregnadas, paños, celofán, láminas de plástico	Ejemplos: chapa de madera, láminas de cartón comprimido, impresiones fotográficas, cuero, lámina de hule espuma
Rotatorio indirecto y transportador de tornillo. Tipo indirecto de operación continua	Aplicable con recirculación del producto seco	Aplicable con recirculación del producto seco	Requiere casi siempre recirculación del producto seco. Se genera poco polvo	Su principal ventaja es la baja pérdida de polvo. Es muy apropiado para la mayor parte de los materiales y capacidades, sobre todo cuando se requiere una desecación a la temperatura del vapor	Pocas pérdidas de polvo. El material no debe adherirse ni ser sensible a la temperatura	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
Lechos fluidos. Por lotes continuos, directos e indirectos	Es aplicable sólo con un lecho inerte o un recirculador de sólidos secos	Véanse las observaciones bajo "Líquidos"	Véanse las observaciones bajo "Líquidos"	Es apropiado si no hay demasiado polvo	Es adecuado para cristales, gránulos y fibras cortas	No es aplicable	Utiliza partículas inertes calientes para el contacto	Utiliza partículas inertes calientes para el contacto
De bandejas vibradoras. Tipo indirecto, operación continua	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	Apropiado para materiales de movimiento libre	Apropiado para materiales de movimiento libre que se pueden transportar en una bandeja vibradora	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
De tambor. Tipo indirecto, operación continua	De uno, dos o tambores gemelos. Operación atmosférica o al vacío. El producto es en forma de escamas y generalmente polvoriento. Los costos de mantenimiento pueden ser elevados	Véanse las observaciones bajo "Líquidos". Los secadores de tambores gemelos se emplean profusamente	Se utiliza sólo cuando la pasta o los lodos pueden fluir. Véanse las observaciones bajo "Líquidos"	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable
De cilindro. Tipo indirecto de operación continua	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	Apropiado para láminas delgadas o mecánicamente débiles que se pueden secar en contacto con una superficie calentada. Se pueden obtener efectos superficiales especiales	Adecuado para materiales que no requieren una desecación plana y que no se dañarán al entrar en contacto con el tambor caliente
Infrarrojo. Operación por lotes o continua	Sólo para películas delgadas	Véanse las observaciones bajo "Líquidos"	Véanse las observaciones bajo "Líquidos" (sólo para capas delgadas)	Sólo para capas delgadas	Apropiado sobre todo para desecar la humedad superficial. No es adecuado para capas gruesas	Apropiado sobre todo para desecar y hornear pinturas y esmaltes	Se emplea comúnmente en combinación con otros métodos. Es útil cuando se tienen limitaciones de espacio	Útil para trabajos de laboratorio o en combinación con otros métodos
Dielectrico. Operación por lotes o continua.	Muy costoso	Véanse las observaciones bajo "Líquidos"	Véanse las observaciones bajo "Líquidos"	Muy costoso	Muy costoso	La desecación rápida de objetos grandes es apropiada para este método	Aplicaciones para las etapas finales de secadores para papel	Muy apropiado para hule espuma. No se ha desarrollado por completo para otros materiales

ANEXO II

Figura I.1. Carta Psicrométrica Aire-Agua en el Sistema Internacional. (Treybal, 1988)

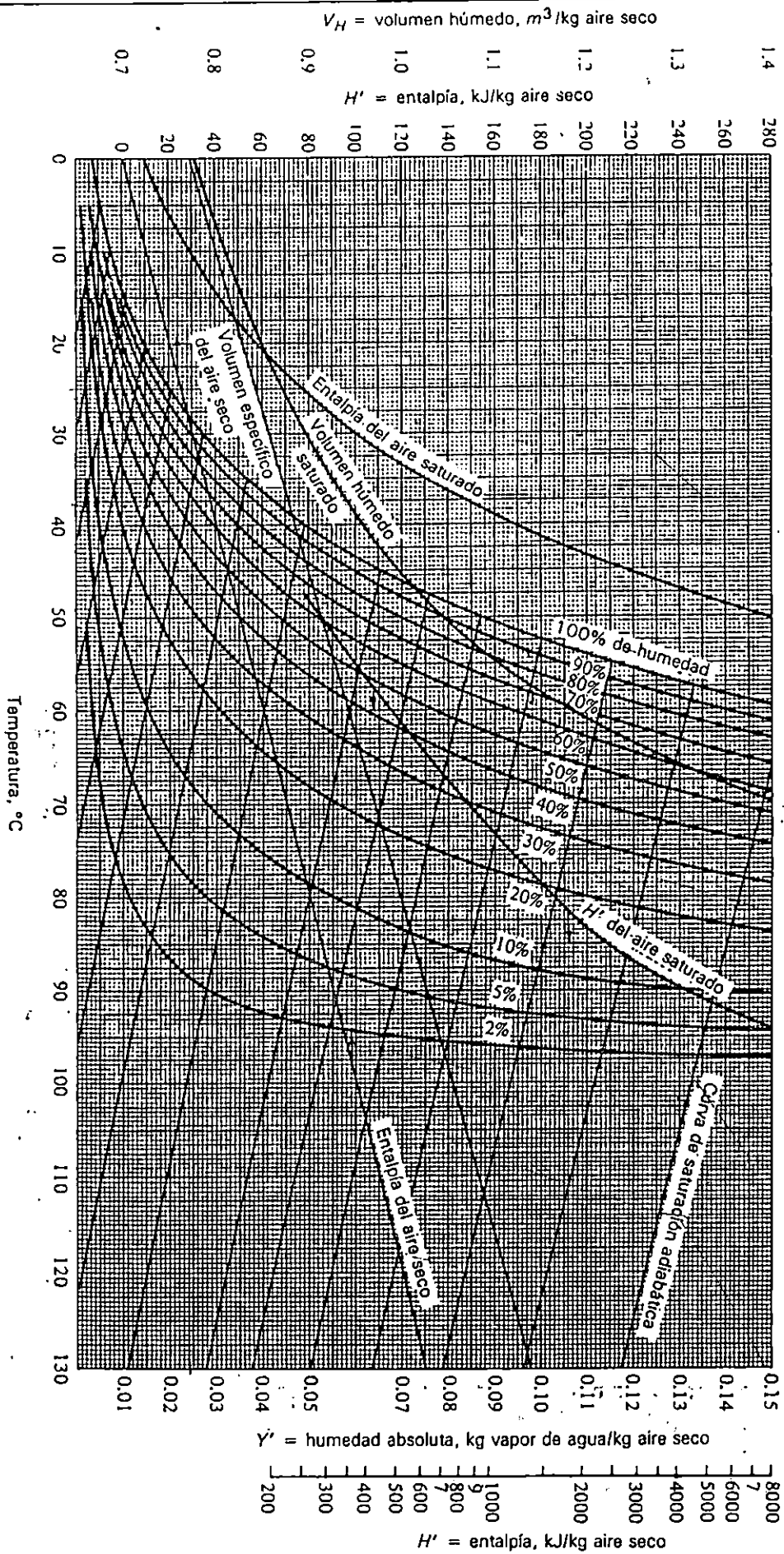
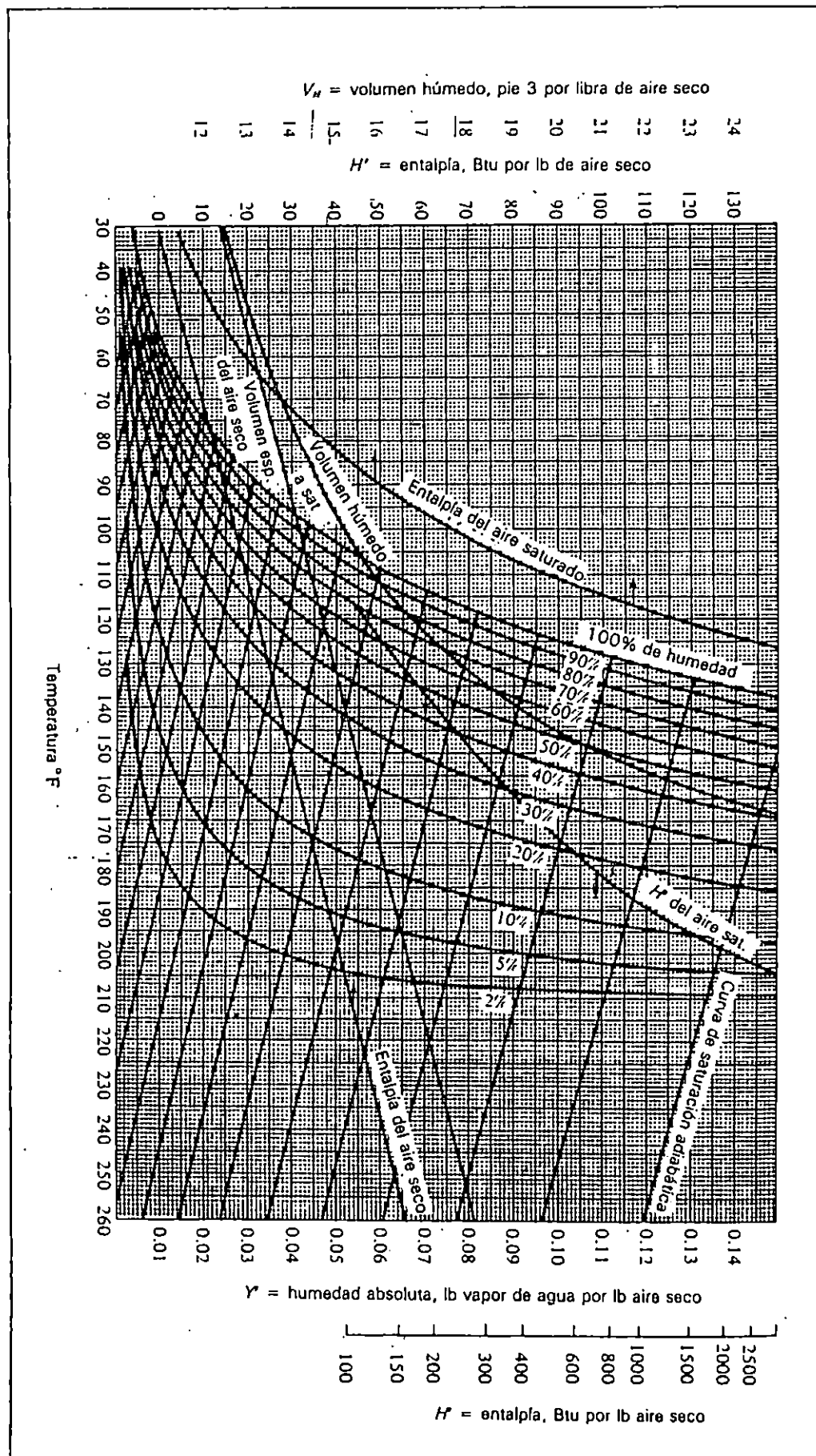


Figura I.2. Carta Psicrométrica Aire-Agua en el Sistema Ingles. (Treybal, 1988)





Cuadro I.3. Emisividad normal total de diversas superficies.

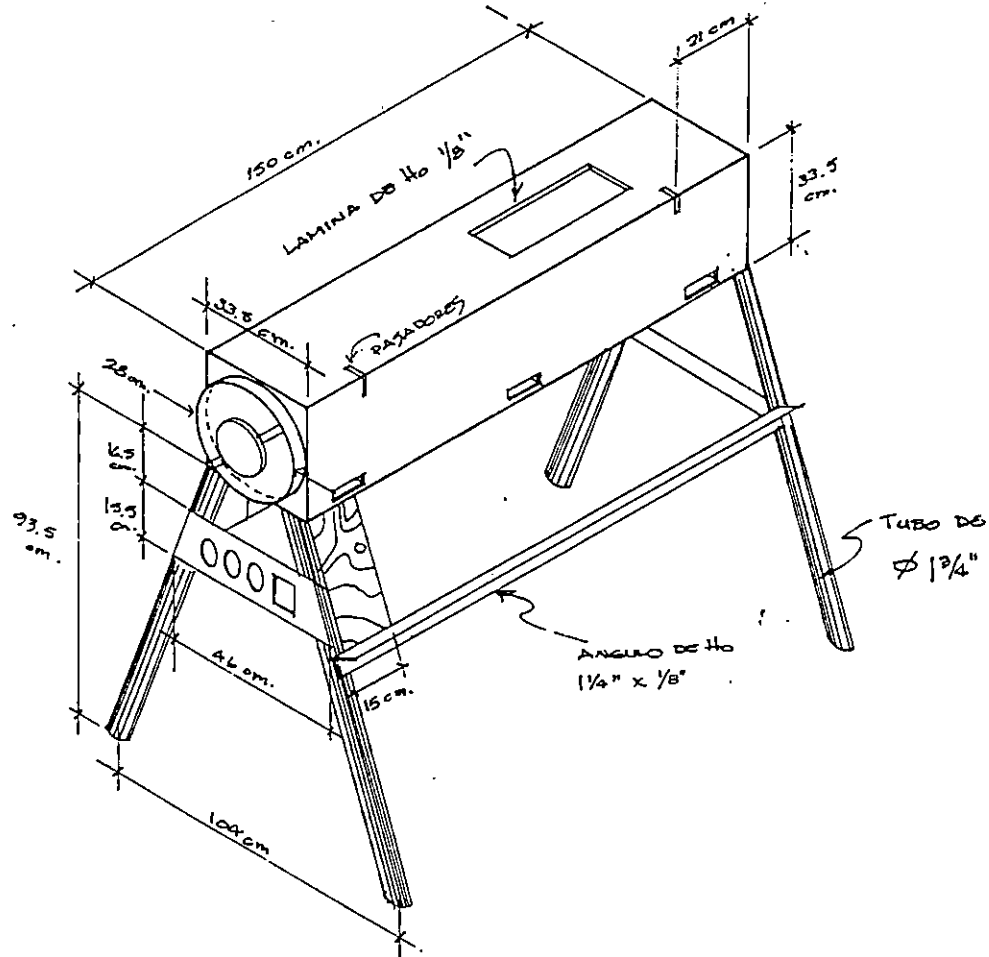
## Metales y sus óxidos.

Superficie	t, °F.*	Emisividad*	Superficie	t, °F.*	Emisividad*
<b>Aluminio</b>			Aceero lam. capa fuerte de óxido rugoso. . . . .	75	0.80
Placa muy pulida, 98.3% pura . . . . .	440-1070	0.039-0.057	Capa de óxido densa y brillante. . . . .	75	0.82
Placa pulida . . . . .	73	0.040	Capa colada:		
Placa áspera . . . . .	78	0.055	Lisa. . . . .	73	0.80
Oxidada 1110°F . . . . .	390-1110	0.11-0.19	Áspera . . . . .	73	0.82
Techo de superficie de aluminio . . . . .	100	0.216	Hierro colado, áspero, muy oxidado . . . . .	100-480	0.95
Superficies calentadas a 1110°F . . . . .			Hierro forjado, oxidado mate. . . . .	70-680	0.94
Cobre . . . . .	390-1110	0.18-0.19	Placa de acero, áspera. . . . .	100-700	0.94-0.97
Aceero . . . . .	390-1110	0.52-0.57	Aceros de aleación a altas temperaturas (véase Aleaciones de níquel).		
<b>Latón</b>			<b>Metal fundido</b>		
Muy pulido:			Hierro colado. . . . .	2370-2550	0.29
73.2% Cu, 26.7% Zn . . . . .	476-674	0.028-0.031	Aceero dulce. . . . .	2910-3270	0.28
62.4% Cu, 36.8% Zn, 0.4% Pb, 0.3% Al . . . . .	494-710	0.033-0.037	<b>Plomo</b>		
82.9% Cu, 17.0% Zn . . . . .	530	0.030	Puro (99.96%), no oxidado. . . . .	260-440	0.057-0.075
<b>Laminada en duro, pulida:</b>			Gris oxidado . . . . .	75	0.281
Con la dirección de pulido visible . . . . .	70	0.038	Oxidado a 390°F . . . . .	390	0.63
Sujeto a ciertos ataques . . . . .	73	0.043	Mercurio . . . . .	32-212	0.09-0.12
Con trazas de estearina del pulido . . . . .	75	0.053	Molibdeno filamento de. . . . .	1340-4700	0.096-0.292
Pulido . . . . .	100-600	0.096	Metal monel, oxidado a 1110°F. . . . .	390-1110	0.41-0.46
Placa laminada, superficie natural. . . . .	72	0.06	<b>Níquel</b>		
Frotada con esmeril grueso . . . . .	72	0.20	Electrodepositado sobre hierro pulido, luego, pulido . . . . .	74	0.045
Placa opaca . . . . .	120-660	0.22	Pulido y técnicamente puro (98.9% Ni, +Mn) . . . . .	440-710	0.07-0.087
Oxidado por calentamiento a 1110°F . . . . .	390-1110	0.61-0.59	Electrodepositado sobre hierro limpio no pulido . . . . .	68	0.11
<b>Cromo; véase Aleaciones de níquel para aceros Ni-Cr.</b>	100-1000	0.08-0.26	Alambre. . . . .	368-1844	0.096-0.186
<b>Cobre</b>			Placa oxidada por calentamiento a 1110°F . . . . .	390-1110	0.37-0.48
Cobre electrolítico pulido cuidadosamente. . . . .	176	0.018	Oxido de níquel . . . . .	1200-2290	0.59-0.86
Comercial, esmerilado y pulido, pero con picaduras . . . . .	66	0.030	<b>Aleaciones de níquel</b>		
Comercial, frotado hasta darle brillo; pero no del tipo de espejo . . . . .	72	0.072	Cromoníquel . . . . .	125-1894	0.64-0.76
Pulida . . . . .	242	0.023	Niquelina (18-32 Ni; 55-68 Cu; 20 Zn), gris, oxidada . . . . .	70	0.262
Placa calentada durante mucho tiempo y cubierta con una capa gruesa de óxido . . . . .	77	0.78	Aceero aleado KA-2S (8% Ni; 18% Cr), plateado ligero, áspero, café tras el calentamiento. . . . .	420-914	0.44-0.36
Placa calentada a 1110°F . . . . .	390-1110	0.57	Después de 42 horas de calentamiento a 980°F. . . . .	420-980	0.62-0.73
Oxido cuproso . . . . .	1470-2010	0.66-0.54	Aleación NCT-3 (20% Ni; 25% Cr), café, rayado, oxidado en servicio . . . . .	420-980	0.90-0.97
Cobre fundido . . . . .	1970-2330	0.16-0.13	Aleación NCT-6 (60% Ni; 12% Cr), liso, negro, cubierta de óxido adhesivo y firme, en servicio . . . . .	520-1045	0.89-0.82
<b>Oro</b>			<b>Platino</b>		
Muy pulido, puro. . . . .	440-1160	0.018-0.035	Placa pulida, pura . . . . .	440-1160	0.054-0.104
<b>Hierro y acero</b>			Fleje. . . . .	1700-2960	0.12-0.17
Superficies metálicas (o capa muy delgada de óxido):			Filamento. . . . .	80-2240	0.036-0.192
Hierro electrolítico, muy pulido . . . . .	350-440	0.052-0.064	Alambre . . . . .	440-2510	0.073-0.182
Hierro pulido. . . . .	800-1880	0.144-0.377	<b>Plata</b>		
Hierro recién esmerilado . . . . .	68	0.242	Pura y pulida. . . . .	440-1160	0.0198-0.0324
Hierro colado, pulido. . . . .	392	0.21	Pulida . . . . .	100-700	0.0221-0.0312
Hierro forjado, muy pulido. . . . .	100-480	0.28	<b>Aceero, véase Hierro</b>		
Hierro colado, recién tomeado. . . . .	72	0.435	Tantalio filamento de . . . . .	2420-5430	0.194-0.31
Pieza de aceero vaciado y pulido . . . . .	1420-1900	0.52-0.56	Estaño-lámina de hierro estañado brillante . . . . .	76	0.043 y 0.064
Aceero laminado esmerilado . . . . .	1720-2010	0.55-0.61	<b>Tungsteno</b>		
Hierro laminado liso . . . . .	1650-1900	0.55-0.60	Filamento, envejecido . . . . .	80-6000	0.032-0.35
Hierro colado, labrado en el torno . . . . .	1620-1810	0.60-0.70	Filamento. . . . .	6000	0.39
<b>Superficies oxidadas:</b>			<b>Cinc</b>		
Placa de hierro, limpia, con baño químico y oxidada hasta que esté roja. . . . .	68	0.612	Comercial, 99.1% puro, pulido . . . . .	440-620	0.045-0.053
Completamente oxidado. . . . .	67	0.685	Oxidado por calentamiento a 750°F. . . . .	750	0.11
Aceero laminado . . . . .	70	0.657	Hierro laminado galvanizado, con brillo . . . . .	82	0.228
Hierro oxidado . . . . .	212	0.736	Hierro laminado galvanizado, gris oxidado . . . . .	75	0.276
Hierro colado, oxidado a 1100°F. . . . .	390-1110	0.64-0.78			
Aceero, oxidado a 1100°F. . . . .	390-1110	0.79			
Hierro electrolítico oxidado liso . . . . .	260-980	0.78-0.82			
Oxido de hierro . . . . .	930-2190	0.85-0.89			



### ANEXO IV

Fig. I.4. Isométrico General de Distribución de Elementos para el secador al nivel de laboratorio



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

TRABAJO DE GRADUACION:  
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE  
CHAROLAS POR LOTES A NIVEL DE PLANTA PILOTO".

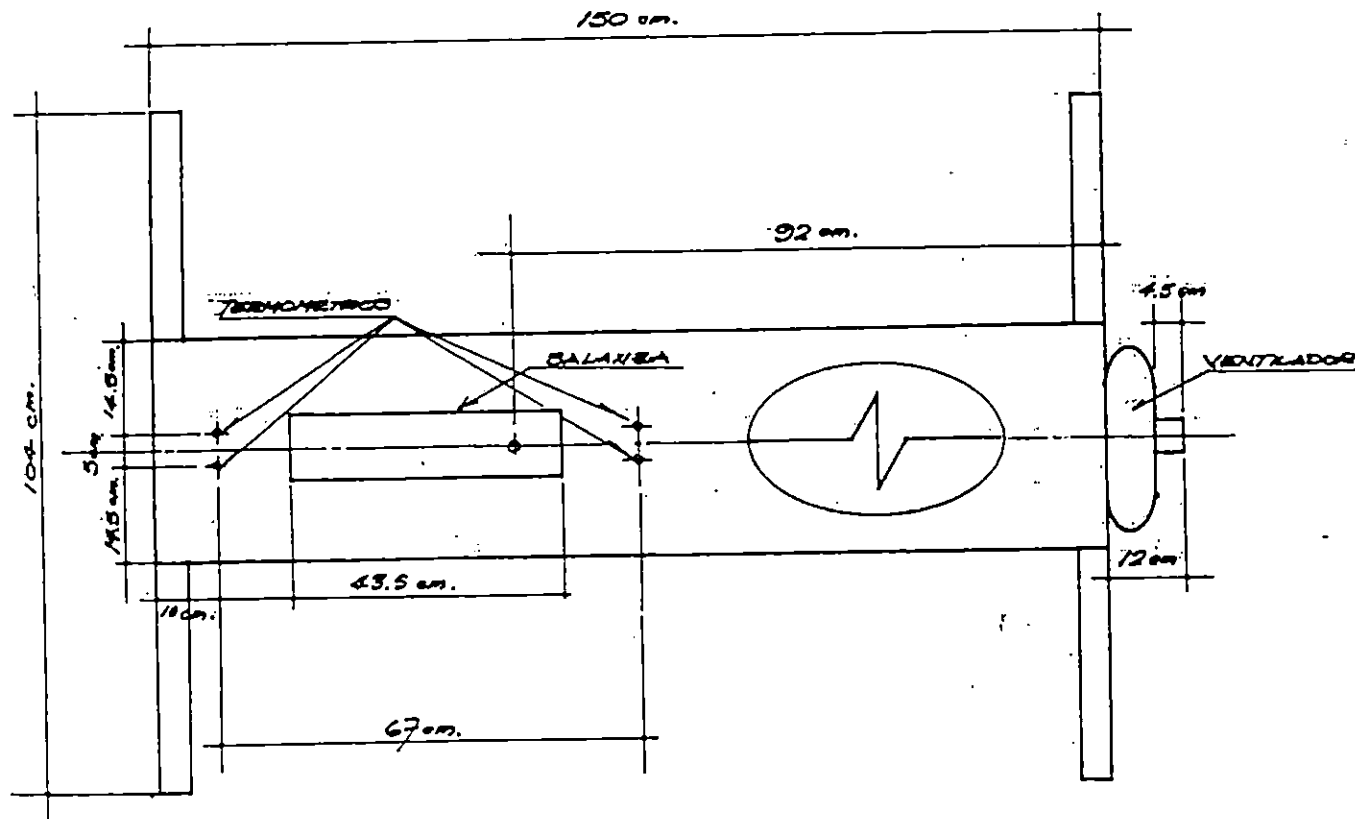
FECHA: 23 DE NOVIEMBRE DE 1999

CONTENIDO:  
DIAGRAMA GENERAL DE DISTRIBUCION  
DE ELEMENTOS PARA SECADOR DE CHAROLAS

PRESENTAN:  
FREDDY ALEXANDER CRUZ  
JUAN ANTONIO MENDEZ  
FRANCISCO ARTURO SOTO

ESCALA: SIN ESCALA

Fig. L5. Vista de planta general del secador al nivel de laboratorio.



PLANTA GENERAL

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

TRABAJO DE GRADUACION:  
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE  
CHAROLAS POR LOTES A NIVEL DE PLANTA PILOTO".

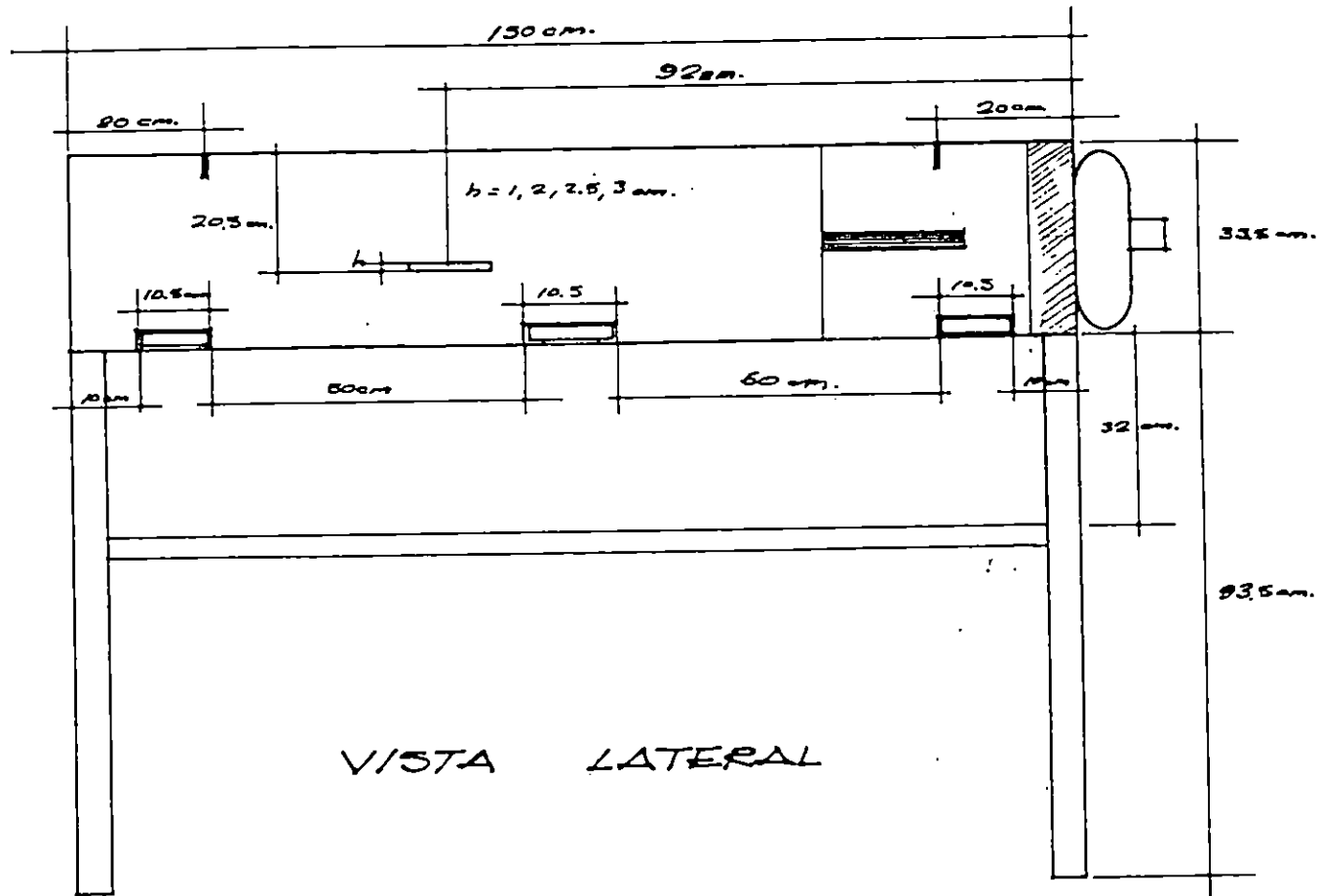
FECHA: 23 DE NOVIEMBRE DE 1999

CONTENIDO:  
VISTAS DE EL SECADOR CONSTRUIDO  
A NIVEL DE LABORATORIO

PRESENTAN:  
FREDDY ALEXANDER CRUZ  
JUAN ANTONIO MENDEZ  
FRANCISCO ARTURO SOTO

ESCALA: SIN ESCALA

Fig. I.6. Vista lateral del secador al nivel de laboratorio.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

TRABAJO DE GRADUACION:  
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE  
CHAROLAS POR LOTES A NIVEL DE PLANTA PILOTO".

FECHA: 23 DE NOVIEMBRE DE 1999

CONTENIDO:  
VISTAS DE EL SECADOR CONSTRUÍDO  
A NIVEL DE LABORATORIO

PRESENTAN:  
FREDDY ALEXANDER CRUZ  
JUAN ANTONIO MENDEZ  
FRANCISCO ARTURO SOTO

ESCALA: SIN ESCALA

## ANEXO V.

### Cuadro I.4. DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIO.

#### Para Silica gel.

T = 40°C, V=5.92 m/s, H=1.0 cm

Peso de bandeja = 56.4gr

Peso de bandeja + SS = 126.65gr

TBH = 27°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	173.4
2	172.6
4	172.2
6	171.3
8	170.6
10	170.0
12	169.4
14	168.8
16	168.0
18	167.4
20	166.8
22	166.1
24	165.6
26	165.0
28	164.3
30	163.8
32	163.2
34	162.7

36	162.0
38	161.5
40	160.8
42	160.4
44	159.8
46	159.2
48	158.6
50	158.1
52	157.7
54	157.0
56	156.1
58	155.7
60	155.3
62	154.8
64	154.1
66	153.5
68	152.9
70	152.5
72	151.9
74	151.4
76	150.9
78	150.4
80	150.1
82	149.4
84	149.0
86	148.6
88	148.3
90	148.0
92	147.5
94	147.2
96	146.7
98	146.2
100	145.9

102	145.6
104	145.3
106	144.9
108	144.8
110	144.6
112	144.4
114	144.1
116	143.9
118	143.7
120	143.4
122	143.2
124	143.1
126	142.8
128	142.5
130	142.4
132	142.3
134	142.2
136	142.1
138	141.9
140	141.7
142	141.3
144	141.1
146	140.9
150	140.7
152	140.6
154	140.5
156	140.4
158	140.3
160	140.2
162	140.0
164	139.8
166	139.4
168	139.0

170	138.7
180	138.2
199.8	137.2
219.6	136.5
240	136.0
259.8	135.4
279.6	134.8
360	134.1

**Para Silica gel.**

T = 50°C, V=5.92 m/s, H=1.0 cm

Peso de bandeja = 58.35gr

Peso de bandeja + SS = 126.65gr

TBH=36°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	171.1
2	170.3
4	169.9
6	169.0
8	168.3
10	167.7
12	167.1
14	166.5
16	165.7
18	165.1
20	164.5
22	163.8
24	163.3
26	162.7
28	162.0
30	161.5
32	160.9
34	160.4
36	159.5
38	158.6
40	158.0
42	157.2
44	156.5

46	155.9
48	155.2
50	154.3
52	153.4
54	152.7
56	152.1
58	151.6
60	151.0
63	150.5
66	149.6
69	148.5
72	147.9
75	147.0
78	146.5
81	145.8
84	145.3
87	144.7
90	144.0
93	143.6
96	143.1
99	142.7
102	142.4
105	142.0
108	141.6
111	141.3
114	140.9
117	140.6
120	140.2
123	139.9
126	139.6
129	139.4
132	139.0
135	138.7

138	138.4
141	138.1
144	137.8
147	137.6
150	137.4
153	137.1
156	136.8
159	136.5
162	136.2
165	135.9
168	135.8
171	135.5
174	135.3
177	135.0
180	134.8
183	134.7
186	134.7
189	134.6
192	134.5
195	134.4
198	134.2
201	134.2
204	134.1
207	134.0
210	133.9
213	133.8
216	133.7
219	133.7
222	133.6
225	133.6
228	133.5
231	133.4
234	133.3

237	133.3
240	133.2
255	133.0
270	132.5
285	132.2
300	132.0
315	131.8
330	131.6
345	131.4
360	131.2
375	131.2
390	131.1
405	131.0
420	131.0

**Para Silica gel.**

T = 60°C, V=5.92 m/s, H=1.0 cm

Peso de bandeja = 58.35gr

Peso de bandeja + SS = 126.65gr

TBH=41°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	169.8
2	169.4
4	168.3
6	167.5
8	166.6
10	165.9
12	165.3
14	164.5
16	163.8
18	163.1
20	162.4
22	161.5
24	160.7
26	160.0
28	159.1
30	158.4
32	157.7
34	157.0
36	156.3
38	155.7
40	155.0
42	154.1
44	153.5

46	152.9
48	152.0
50	151.3
52	150.7
54	150.0
56	149.4
58	148.5
60	148.0
62	147.5
64	146.6
66	146.0
68	145.8
70	145.2
72	144.4
74	143.9
76	143.5
78	143.1
80	142.7
82	142.4
84	142.0
86	141.6
88	141.4
90	141.0
92	140.8
94	140.4
96	140.2
98	140.0
100	139.6
102	139.4
104	139.1
106	138.9
108	138.7
110	138.5

112	138.2
114	138.0
116	137.7
118	137.4
120	137.2
123	136.9
126	136.6
129	136.5
132	135.9
135	135.6
138	135.5
141	135.2
144	134.9
147	134.7
150	134.4
153	134.1
156	133.9
159	133.8
162	133.5
165	133.3
168	133.1
171	132.8
174	132.7
177	132.6
180	132.4
183	132.2
186	132.0
189	131.9
192	131.7
195	131.6
198	131.4
201	131.3
204	131.2

207	131.0
210	130.9
213	130.8
216	130.7
219	130.6
222	130.5
225	130.4
228	130.3
231	130.3
234	130.2
237	130.1
240	130.0
255	129.7
270	129.4
285	129.1
290	129.0
305	128.9
320	128.6
335	128.5
350	128.5
365	128.5
380	128.5

Para Silica gel.

T = 70°C, V=5.92 m/s, H=1.0 cm

Peso de bandeja = 58.35gr

Peso de bandeja + SS = 126.65gr

TBH=41°C

46	148.0
48	147.2
50	146.3
52	145.7
54	144.7
56	143.9
58	143.4
60	143.2
62	142.9
64	142.3
66	141.8
68	141.5
70	141.1
72	140.4
74	139.8
76	139.4
78	139.0
80	138.9
82	138.7
84	138.4
86	138.1
88	137.7
90	137.5
92	137.2
94	136.8
96	136.4
98	136.2
100	135.9
102	135.7
104	135.4
106	135.2
108	134.9
110	134.6

112	134.5
114	134.3
116	134.0
118	133.8
120	133.6
123	133.2
126	133.1
129	132.7
132	132.5
135	132.1
138	132.0
141	131.8
144	131.5
147	131.3
150	131.1
153	130.8
156	130.6
159	130.5
162	130.4
165	130.3
168	130.1
171	129.9
174	129.8
177	129.7
180	129.6
183	129.5
186	129.4
189	129.2
192	129.0
195	128.9
198	128.8
201	128.8
204	128.7

207	128.6
210	128.5
213	128.4
216	128.4
219	128.3
222	128.3
225	128.3
228	128.3
231	128.2
234	128.1
237	128.1
240	128.1
255	128.1
270	128.0

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	170.0
2	168.8
4	167.8
6	167.2
8	166.1
10	165.2
12	164.2
14	163.1
16	162.1
18	161.0
20	160.0
22	159.2
24	158.2
26	157.0
28	156.2
30	155.2
32	154.0
34	153.2
36	152.2
38	151.3
40	150.5
42	149.5
44	148.8

**Para Silica gel.**

T = 40°C, V=6.74 m/s, H=1.0 cm

Peso de bandeja = 58.35gr

Peso de bandeja + SS = 126.65gr

TBH=28°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	174.9
2	174.1
4	173.6
6	173.1
8	172.4
10	172.0
12	171.5
14	171.1
16	170.6
18	170.2
20	169.7
22	169.1
24	168.6
26	168.3
28	167.8
30	167.3
32	166.8
34	166.5
36	165.9
38	165.5
40	165.0
42	164.5
44	164.1

46	163.7
48	163.2
50	162.8
52	162.1
54	161.7
56	161.4
58	160.9
60	160.4
62	160.0
64	159.7
66	159.2
68	158.7
70	158.3
72	157.9
74	157.2
76	157.0
78	156.6
80	156.2
82	155.7
84	155.2
86	154.7
88	154.3
90	153.9
92	153.4
94	153.0
96	152.5
98	152.0
100	151.6
102	151.3
104	150.9
106	150.5
108	150.2
110	149.8

112	149.4
114	148.9
116	148.6
118	148.3
120	148.1
123	147.6
126	147.2
129	146.5
132	146.3
136	145.7
138	145.5
141	145.3
144	145.0
147	144.6
150	144.4
153	144.2
157	143.7
160	143.5
165	143.0
168	142.7
171	142.4
174	142.1
177	142.0
180	141.9
183	141.8
186	141.5
189	141.5
192	141.3
201	140.7
204	140.5
207	140.3
210	140.2
213	140.0

216	139.9
219	139.7
222	139.6
225	139.5
228	139.4
231	139.3
234	139.1
237	138.9
240	138.7
255	138.2
270	137.6
285	137.3
300	136.7
315	136.4
330	136.1
346	135.7
375	135.4
405	135.1
435	134.7
450	134.5
465	134.4



**Para Silica gel.**

T = 50°C, V=6.74 m/s, H=1.0 cm

Peso de bandeja = 58.35gr

Peso de bandeja + SS = 126.65gr

TBH=31°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	171.2
2	170.4
4	170.0
6	169.3
8	168.6
10	167.7
12	166.8
14	166.2
16	165.3
18	164.7
20	163.9
22	163.3
24	162.5
26	161.8
28	161.1
30	160.3
32	159.5
34	158.7
36	158.0
38	157.3
40	156.6
42	156.1
44	155.2

46	154.5
48	153.8
50	152.9
52	152.4
54	151.9
56	151.3
58	150.6
60	149.8
62	149.2
64	149.0
66	148.4
68	147.8
70	147.3
72	146.9
74	146.3
76	146.0
78	145.5
80	145.1
82	144.7
84	144.3
86	144.1
88	143.8
90	143.4
92	143.0
94	142.7
96	142.5
98	142.1
100	141.9
102	141.7
104	141.4
106	141.1
108	141.0
110	140.7

112	140.4
114	140.1
116	140.0
118	139.9
120	139.6
123	139.2
126	139.0
129	138.5
132	138.4
135	138.1
138	137.7
141	137.5
144	137.3
147	137.1
150	136.6
153	136.5
156	136.3
159	136.1
162	135.8
165	135.7
168	135.4
171	135.3
174	135.0
177	134.8
180	134.6
186	134.5
195	134.3
201	133.9
208	133.6
213	133.4
219	133.2
229	133.0
237	132.7

240	132.6
258	132.4
270	132.0
285	131.8
300	131.6
320	131.5
345	131.0
360	130.8
375	130.8
390	130.7
405	130.7
420	130.6
435	130.5
450	130.5
505	130.4
520	130.4

Para Silica gel.

T = 60°C, V=6.74 m/s, H=1.0 cm

Peso de bandeja = 58.35gr

Peso de Bandeja + SS =126.65 gr

TBH=32°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	161.1
3	160.0
6	158.8
9	157.6
12	156.2
16	154.1
21	151.9
27	149.6
34	146.9
36	145.7
39	145.0
42	144.7
45	143.4
48	143.0
51	142.4
54	141.0
60	140.8
63	140.3
66	139.8
69	139.3
72	138.9
75	138.4
78	138.2

81	137.7
84	137.4
87	137.2
90	136.8
93	136.5
96	136.2
99	136.0
102	135.8
105	135.5
108	135.2
111	135.0
114	134.8
117	134.6
120	134.3
130	133.7
140	133.0
150	132.5
160	132.1
170	131.7
180	131.3
190	131.1
200	130.8
210	130.5
220	130.3
230	130.1
240	130.0
255	129.8
270	129.7
304	129.3
330	129.2

**Para Silica gel.**

T = 40°C, V=5.92 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr

Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr

TBH=28°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	230.3
3	229.0
6	228.3
9	227.7
12	227.0
15	226.4
18	225.9
21	225.2
24	224.6
27	223.9
30	223.3
33	222.8
36	222.0
39	221.5
42	220.9
45	220.4
48	220.1
51	219.2
54	218.7

60	217.3
63	216.7
67	216.2
69	215.7
72	215.1
76	214.4
78	213.9
81	213.4
84	212.8
87	212.2
90	211.7
93	211.2
96	210.8
99	210.3
102	209.6
108	208.6
111	208.1
117	207.4
120	206.9
123	206.5
126	206.3
129	206.0
132	205.4
135	205.0
138	204.6
141	204.3
144	203.9
147	203.5
150	203.2

153	202.9
156	202.6
167	201.5
171	201.0
180	200.4
189	200.0
213	198.0
219	197.6
225	197.3
231	197.0
237	196.7
243	196.4
249	196.1
255	195.8
283	194.6
289	194.3
295	194.2
310	193.6
325	193.0
340	192.5
355	192.3
385	191.7
415	190.8
445	190.2
477	189.5

Para Silica gel.

T = 50°C, V=5.92 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr

Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr

TBH=30°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	232.8
3	231.1
6	230.4
9	229.7
12	228.7
15	227.9
18	226.9
21	226.0
24	225.1
27	224.4
30	223.4
33	222.4
36	221.6
39	220.6
42	220.3
45	219.0
48	218.2

51	217.3
54	216.5
57	215.9
60	215.1
63	214.5
66	213.6
69	212.8
72	212.2
75	211.2
78	210.4
82	210.0
84	209.3
87	208.6
90	208.0
95	206.5
100	205.4
105	204.4
110	203.5
115	202.7
120	202.1
125	201.3
130	200.7
136	200.0
145	199.0
150	198.7
155	198.1
167	196.6

175	195.8
180	195.5
186	194.9
193	194.3
196	194.0
200	193.6
211	192.8
223	192.0
240	190.9
250	190.4
260	190.0
270	189.6
280	189.2
290	188.8
300	188.1
310	187.4
320	186.9
330	186.7
340	186.4
350	186.2
360	186.1
370	185.9
375	185.7
405	184.8
435	184.5

Para Silica gel

.

T = 60°C, V=5.92 m/s, H=1.5 cm  
 Peso de Bandeja = 62.6 gr  
 Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr  
 TBH=32°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	204.9
2	204.5
4	204.1
6	203.6
8	203.0
10	202.4
12	201.9
14	201.5
16	201.1
18	200.6
20	200.1
22	200.0
24	199.7
26	199.2
28	198.8
30	198.5
32	198.1
34	197.7
36	197.4

38	197.2
40	196.8
42	196.5
44	196.1
46	196.0
48	195.7
50	195.4
52	195.1
54	194.8
56	194.6
58	194.3
60	194.1
62	193.8
64	193.6
66	193.3
68	193.0
70	192.8
72	192.7
112	188.9
114	188.7
116	188.6
118	188.4
120	188.3
123	187.9
126	187.8
129	187.5
132	187.2
135	187.1

138	186.8
144	186.5
150	186.0
156	185.6
162	185.2
168	184.8
174	184.5
180	184.1
186	183.8
192	183.4
201	183.0
210	182.6
220	181.9
230	181.6
240	181.0
250	180.5
260	180.1
270	179.6
280	179.3
290	179.0
300	178.6
315	178.1
330	177.7
345	177.4
375	176.4
405	175.9
435	175.7

Para Silica gel.

T = 70°C, V=5.92 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr

Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr

TBH=33°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	230.2
3	229.1
6	228.0
9	226.7
12	225.1
15	223.9
18	222.7
21	221.4
24	220.1
27	219.1
30	217.8
33	216.1
36	214.9
39	213.8
42	212.3
45	211.1
48	209.9
51	208.8
54	207.9
57	206.8
60	206.0
65	203.9
70	202.5

75	201.1
80	199.9
85	199.1
90	198.1
95	197.0
100	196.1
106	195.4
110	194.6
115	193.7
120	192.9
125	192.1
130	191.6
135	190.9
140	190.2
145	189.8
150	189.1
155	188.4
160	187.8
165	186.8
175	186.5
180	186.1
195	184.3
210	183.4
225	182.2
240	181.2
256	180.1
273	179.3
285	178.7
300	178.1
315	177.7
331	177.0
345	176.7
360	176.3

Para Silica gel.

T = 40°C, V=6.74 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr

Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr

TBH=28°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	233.2
4	232.5
6	232.3
9	231.5
12	231.0
15	230.7
21	229.6
24	229.1
27	228.8
30	228.2
34	227.4
36	227.1
42	226.1
45	225.5
48	225.0
54	224.0
57	223.5
60	223.0
63	222.6
66	221.9
69	221.5
75	220.5
78	219.8
81	219.4

84	218.7
87	218.2
90	217.7
95	216.9
100	216.2
105	215.3
110	214.5
115	213.6
120	212.8
125	212.2
130	211.4
135	210.8
143	209.8
145	209.4
150	208.8
155	208.0
160	207.5
165	206.8
170	206.1
175	205.6
180	204.9
190	203.9
200	203.2
210	202.2
232	201.4
243	200.5
250	199.8
260	199.4
270	198.8
285	198.0
300	197.5
315	196.9

Para Silica gel.

T = 50°C, V=6.74 m/s, H=1.5 cm  
 Peso de Bandeja = 62.6 gr  
 Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr  
 TBH=30°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	231.7
3	231.1
6	230.3
9	229.6
12	228.5
15	227.7
18	226.9
21	226.2
24	225.2
28	224.2
31	223.2
36	221.7
39	220.9
42	220.1
45	219.6

48	218.7
51	217.8
54	216.9
57	216.2
60	215.5
63	214.7
66	213.9
69	213.1
72	212.5
75	211.7
78	211.1
81	210.1
88	208.6
90	208.1
93	207.5
96	206.9
99	206.4
102	205.6
105	205.0
108	204.5
111	203.9
114	203.4
117	203.2
120	202.5
125	201.7
130	201.2

135	200.3
140	200.0
145	199.5
150	198.9
155	198.4
160	198.0
165	197.4
170	196.9
177	196.3
180	196.1
190	195.3
200	194.6
210	193.9
220	193.4
230	192.8
240	192.1
250	191.2
270	190.8
285	190.2
300	189.5
363	187.4
392	185.9
428	185.1
460	184.4



**Para Silica gel.**

T = 60°C, V=6.74 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr

Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr

TBH=32°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	243.9
3	242.6
6	241.6
9	240.4
12	239.3
15	238.1
18	237.2
21	236.1
27	234.8
30	234.0
33	232.8
36	231.8
39	230.7
42	229.6
45	228.5
48	227.6
51	226.5
54	225.5

57	224.3
60	223.3
63	221.3
66	220.2
69	219.4
72	218.4
75	217.4
78	216.4
81	215.1
84	214.2
87	213.2
90	212.8
93	211.7
96	211.0
99	210.1
102	208.9
105	208.3
108	207.2
111	206.7
114	205.6
117	205.1
120	204.2
125	203.1
130	202.0
135	201.1
140	202.2
145	199.6
150	198.8
170	194.9
175	194.4

180	193.3
185	193.3
190	192.9
195	192.3
200	191.8
207	191.4
210	191.0
215	190.7
220	190.1
225	189.7
230	189.4
235	189.1
240	188.3
250	187.5
260	187.0
270	186.3
280	185.7
290	185.0
300	184.4
310	183.9
320	183.5
330	182.9
340	182.0
350	181.5
360	181.1
390	180.2
420	179.5
450	179.1

Para Silica gel.

T = 70°C, V=6.74 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr

Peso de Bandeja + SS = 171.75 gr

TBH=34°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	250.5
3	249.4
6	248.4
9	247.2
15	244.6
18	243.2
21	241.8
24	240.5
27.5	238.8
30	238.0
33	236.5
36	235.2
39	233.9
42	232.5
45	230.1
48	229.1
51	228.4

54	227.0
57	225.9
60	224.6
63	223.6
66	222.1
69	220.1
72	219.8
75	218.0
78	217.2
82	216.0
84	214.9
87	213.7
90	212.1
93	211.0
96	210.4
99	208.9
102	208.1
105	206.4
108	206.0
111	204.9
114	204.2
117	203.3
120	202.3
125	201.0
135	199.5
140	198.3
145	197.6
150	196.6
157	195.5

160	195.3
165	194.6
170	193.3
175	193.3
180	192.7
185	192.3
190	191.8
195	191.3
200	190.8
205	190.1
210	189.4
215	188.4
225	188.2
230	187.8
235	187.4
240	187.1
250	186.4
264	185.3
272	184.4
280	184.2
290	183.5
300	183.1
319	182.1
332	181.4
349	180.0
364	179.7
383	178.5
395	178.0

**Para Silica gel.**

T = 40°C, V=5.92 m/s, H=2.0 cm

Peso de Bandeja =67.65 gr

Peso de Bandeja + SS = 212.75 gr

TBH=29°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	303.5
3	302.8
6	302.4
9	302.0
12	301.5
15	301.2
18	300.7
21	300.4
24	300.0
27	299.9
30	299.5
33	298.9
36	298.5
39	298.0
42	297.7
45	297.1
48	296.5
51	296.3

54	295.8
57	295.5
60	294.8
63	294.5
66	294.1
69	293.7
72	293.2
75	292.8
78	292.3
81	291.9
84	291.4
87	291.0
90	290.6
93	290.2
96	289.7
99	289.2
102	289.0
105	288.5
108	288.1
111	287.8
114	287.3
117	286.9
120	286.6
125	285.8
130	285.1
135	284.5
140	283.8
145	283.2
150	282.5

155	281.9
160	281.2
165	280.5
170	279.9
175	279.3
180	278.8
190	277.2
200	276.1
210	274.7
220	273.7
230	272.4
240	270.7
250	270.2
260	269.1
270	267.7
280	266.7
290	265.6
300	264.5
314	262.9
320	262.3
330	261.4
340	260.4
350	259.5
360	258.6
375	257.2
390	256.2
405	255.1
420	254.3

**Para Silica gel.****T = 50°C, V = 5.92 m/s, H = 2.0 cm****Peso de Bandeja = 67.65 gr****Peso de Bandeja + SS = 212.75 gr****TBH = 30°C**

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	300.0
5	299.0
10	298.0
15	297.0
20	295.6
25	294.6
30	293.7
35	292.6
40	291.6
45	290.4
50	289.4
55	288.3
60	287.2
65	286.3
70	285.2
75	284.3
80	283.2
85	282.3
90	281.2

95	280.3
100	279.3
105	278.5
110	277.5
115	276.4
120	275.4
125	274.6
130	273.6
135	272.6
140	271.7
145	270.8
150	269.5
155	268.5
160	267.7
165	266.7
170	265.7
175	264.8
180	264.0
192	262.4
202	260.7
212	259.3
222	257.7
232	255.8
242	254.0
252	253.2
262	252.1
272	251.6
282	250.7
292	249.8
302	249.1
312	248.5

322	247.7
332	247.2
342	246.7
352	246.1
362	245.7
372	245.0
382	244.5
392	244.2
412	243.5
427	242.8
442	242.2
457	241.5
467	241.2

Para Silica gel.

T =60°C, V=5.92 m/s,

H=2.0 cm

Peso de Bandeja =67.65 gr

Peso de Bandeja + SS =

212.75 gr

TBH=31°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	304.0
3	303.1
6	302.5
10	301.5
12	301.0
15	300.1
18	299.7
21	298.8
24	298.0
27	297.1
30	296.2
33	295.3
36	294.5
39	293.5
42	292.6
45	291.8
48	290.9
51	290.1
54	289.4

57	288.6
60	287.8
63	287.0
66	286.2
69	285.3
72	284.5
75	283.7
78	282.9
81	282.2
84	281.3
87	280.7
90	280.0
93	279.2
96	278.5
99	277.6
102	276.9
105	276.2
108	275.5
111	274.7
114	274.0
117	273.3
120	272.7
126	271.3
129	270.5
132	269.9
135	269.2
141	267.8
144	266.8
147	266.2
150	265.5
153	265.0
156	264.1

159	263.5
162	262.9
165	262.1
168	261.3
174	260.2
177	259.6
180	259.2
185	258.0
190	256.9
195.5	256.0
201	255.0
205	254.3
210	253.4
215	252.6
220	252.0
225	251.3
230	250.8
235	250.2
240	249.5
245	249.0
250	248.5
255	247.9
260	247.5
266	246.9
270	246.6
275	246.1
280	245.8
285	245.3
290	245.0
295	244.5
300	244.1
310	243.5

320	242.8
330	242.1
340	241.6
350	240.9
360	240.3
375	239.5
390	238.6
405	237.9
420	237.1
435	236.5
450	235.8
465	235.2
480	234.6

Para Silica gel.

T=40°C, V=6.74 m/s, H=2.0 cm

Peso de Bandeja =67.65 gr

Peso de Bandeja + SS = 212.75 gr

TBH=29°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	301.0
3	300.9
6	300.5
9	300.2
12	300.0
15	299.7
18	299.2
30	297.1
33	296.6
36	296.1
39	295.5
42	295.1
48	294.2
54	293.2
57	292.7
60	292.4
63	291.8
66	291.3

69	290.8
72	290.4
75	289.8
81	289.0
84	288.4
87	287.8
90	287.5
93	287.0
96	286.5
99	286.0
101	285.6
123	282.3
125	281.6
130	281.1
135	280.5
140	279.6
145	278.8
150	277.9
155	277.1
160	276.3
165	275.7
170	274.8
175	274.1
180	273.3
185	272.4
190	271.8
195	271.0
230	268.8
238	267.8

240	267.3
246	266.3
250	265.5
255	265.0
260	264.3
265	263.7
275	262.8
280	262.1
285	261.5
290	260.6
300	260.1
310	258.8
320	257.8
331	256.6
340	256.0
350	254.8
367	253.8
380	252.8
391	251.5
400	250.9
420	250.4
440	249.0

**Para Silica gel.**

T =50°C, V=6.74 m/s, H=2.0 cm

Peso de Bandeja =67.65 gr

Peso de Bandeja + SS = 212.75 gr

TBH=31°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	302.3
5	301.1
10	300.0
15	299.0
20	297.2
25	296.2
30	295.0
35	293.9
40	292.6
45	291.3
50	290.2
55	289.1
60	287.9
65	286.8
71	285.4
75	284.4
80	283.3
85	282.1
90	281.0
95	279.7

100	278.6
105	277.7
110	276.6
115	275.7
120	274.8
125	274.2
130	273.2
135	272.1
140	271.1
145	270.3
150	269.3
155	268.4
160	267.4
165	266.6
170	265.8
175	264.9
180	264.2
190	262.5
200	261.2
210	259.6
220	258.3
230	257.2
240	256.0
250	255.0
260	254.2
270	253.2
280	252.4
290	251.6

**Para Silica gel.**

T =60°C, V=6.74 m/s, H=2.0 cm

Peso de Bandeja =67.65 gr

Peso de Bandeja + SS = 212.75 gr

TBH=33°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	294.0
5	292.0
10	290.4
16	288.5
20	287.2
25	285.4
31	283.4
35	281.8
40	280.1
46	278.1
50.5	276.5
55	275.2
60	273.3
65	271.8
70	270.1
75	268.7
80	266.8
85	265.4

92	263.1
95	262.0
100	260.4
105	258.8
110	257.5
115	256.4
120	255.5
125	254.4
130	253.6
135	252.6
140	251.8
145	251.1
150	250.3
155	249.6
160	249.0
165	248.3
170	247.6
175	247.1
180	246.5
185	245.9
190	245.4
195	244.8
200	244.5
205	243.9
210	243.4
220	242.4
230	241.5
240	240.9
250	240.1
262	239.1
270	238.5

280	237.8
292	237.0
302	236.7
315	236.0
330	235.0
345	234.0
360	233.0
375	232.2
390	231.3
405	230.1
420	229.8
435	229.1
450	228.4



**Para Silica gel.**

T = 70°C, V = 6.74 m/s, H = 2.0 cm

Peso de Bandeja = 67.65 gr

Peso de Bandeja + SS = 212.75 gr

TBH = 34°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	309.4
3	307.8
6	307.1
9	305.9
12	305.0
15	303.7
18	302.2
21	301.5
24	300.3
27	299.3
30	298.3
33	297.4
36	296.1
39	295.1
42	293.6
45	292.4
48	291.5
51	290.0
54	289.5
57	288.2

60	287.0
63	286.0
66	284.7
69	283.6
72	282.8
75	281.5
78	280.1
81	279.6
84	278.6
87	277.5
90	276.4
93	275.7
96	274.2
99	273.6
102	272.7
105	271.2
108	270.1
111	269.7
114	268.8
117	267.9
120	267.1
125	265.7
130	264.2
136	262.7
140	261.5
146	260.0
150	259.5
160	257.1
165	256.0
170	254.8
175	253.9

180	252.9
185	252.2
190	251.3
195	250.1
200	249.9
205	249.1
212	247.9
215	247.6
220	247.1
225	246.3
230	245.7
235	245.1
240	244.5
245	244.0
250	243.4
255	242.9
260	242.1
265	241.7
270	241.1
275	240.1
280	240.0
285	239.8
290	239.3
295	238.9
300	238.5
315	237.3
330	236.1
345	235.1
360	234.1
375	233.1

**Para Silica gel.**

**T =40°C, V=5.92 m/s, H=3.0 cm**

**Peso de Bandeja =68.8 gr**

**Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr**

**TBH=30°C**

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Peso (gr)</b>
0	325.2
6	324.1
12	323.4
18	322.5
27	321.4
30	320.9
36	320.4
42	319.5
49	318.5
54	318.0
60	317.2
66	316.4
72	315.8
78	315.0
84	314.4
90	313.6
96	313.0
102	312.1

108	311.3
114	310.6
120	309.8
126	309.1
132	308.5
138	307.7
144	307.1
150	306.5
156	305.8
162	305.2
168	304.6
174	304.0
180	303.3
190	302.2
200	301.4
210	300.3
220	299.3
230	298.3
240	297.2
255	295.7
271	294.1
285	292.8
300	291.4
328	289.2
345	287.6
360	286.4
373	285.5
390	284.0

**Para Silica gel.**

**T =50°C, V=5.92 m/s, H=3.0 cm**

Peso de Bandeja =68.8 gr

Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr

TBH=34°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	313.1
6	312.1
12	311.1
18	310.0
24	309.1
30	308.1
36	306.8
45	305.2
54	303.5
60	302.5
66	301.3
72	300.3
78	299.4
84	298.4
90	297.3
96	296.4
102	295.1
108	294.2
114	293.2
120	292.1

127	291.0
132	290.4
138	289.4
144	288.3
150	287.4
156	286.6
162	285.8
168	284.9
174	284.0
180	283.4
190	282.1
200	280.9
210	279.8
220	278.7
230	277.6
240	276.6
250	275.8
260	274.9
270	274.2
280	273.6
290	272.8
300	272.2
315	271.2
330	270.4
345	269.4
388	267.1
405	266.4
420	265.7
435	265.0

**Para Silica gel.**

**T =60°C, V=5.92 m/s, H=3.0 cm**

**Peso de Bandeja =68.8 gr**

**Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr**

**TBH=33°C**

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	316.9
6	315.7
12	314.0
18	312.4
24	310.9
32	308.7
36	307.3
43	305.8
48	304.4
54	303.0
60	301.5
66	300.0
72	298.1
78	296.7
84	295.3
90	293.9
96	292.9
102	291.2
108	289.7
120	286.8

126	285.0
132	284.5
138	283.1
150	280.8
156	279.7
163	278.5
168	277.6
174	276.7
180	275.7
190	274.3
200	273.1
210	271.9
220	270.9
230	269.7
240	268.8
250	267.9
260	267.1
270	266.1
281	265.4
290	264.6
300	263.8
315	262.6
330	261.5
345	260.8
360	259.9
375	259.0
390	258.2
405	257.1

**Para Silica gel.**

T =70°C, V=5.92 m/s, H=3.0 cm

Peso de Bandeja =68.8 gr

Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr

TBH=34°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	315.8
6	313.4
12	311.0
18	308.9
24	306.8
30	304.9
36	302.9
42	301.1
49	299.3
55	297.5
61.5	295.4
66	294.3
75	291.7
78	291.0
84	289.3
91	287.6
99	285.6
102	284.9
108	283.3
114	282.0

120	280.8
127	279.2
135	277.5
138	277.0
144	276.0
150	274.9
156	273.9
162	273.0
168	272.1
174	271.3
180	270.3
192	268.7
200	267.7
210	266.5
220	265.4
230	264.2
240	263.3
250	262.2
260	261.2
270	260.1
280	259.2
290	258.4
300	257.5
315	256.4
330	255.4
345	254.4
360	253.4
375	252.5
390	251.6
405	250.6
420	249.9

**Para Silica gel.**

T =40°C, V=6.74 m/s, H=3.0 cm

Peso de Bandeja =68.8 gr

Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr

TBH=28°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	333.3
6	332.5
12	331.4
21	329.9
24	329.5
32	327.8
36	327.2
42	326.4
48	325.1
54	324.1
60	323.1
66	322.1
72	321.3
78	320.4
84	319.8
91.25	318.5
97	317.7
102	317.3
108	316.1
114	315.5
122	314.6
132	313.3

138	312.5
144	311.6
150	310.9
156	310.2
162	309.4
168	308.6
174	307.8
180	307.1
190	305.9
200	304.6
210	303.5
220	302.3
230	301.1
240	299.4
250	298.9
260	297.9
276	295.8
280	295.5
290	294.5
300	293.3
310	292.4
320	291.4
332	290.3
340	289.8
350	288.8
360	287.9
375	286.6
390	285.5
405	284.4

Para Silica gel.

T =50°C, V=6.74 m/s, H=3.0 cm

Peso de Bandeja =68.8 gr

Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr

TBH=31°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	326.2
6	325.2
12	324.2
18	322.8
24	321.7
30	320.6
36	319.7
42	318.5
48	317.2
69	313.3
73	312.5
78	311.7
84	310.6
93	309.0
96	308.4
102	307.4
108	306.3
114	305.3
120	304.4
126	303.2

132	302.1
141	300.7
144	300.1
150	299.7
156	298.5
165	296.9
168	296.4
174	295.4
180	294.5
192	292.6
210	290.0
219	288.6
222	288.4
228	287.4
234	286.5
240	285.8
246	285.1
252	284.3
258	283.6
264	282.9
270	282.1
277	281.4
282	280.9
288	280.3
294	279.9
300	279.2
310	278.1
320	277.1
330	276.2

340	275.3
350	274.6
364	273.3
376	272.6
390	271.5
405	270.6
420	269.6
435	268.7
450	267.9
465	267.2
478	266.4

**Para Silica gel.**

**T =60°C, V=6.74 m/s, H=3.0 cm**

**Peso de Bandeja =68.8 gr**

**Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr**

**TBH=34°C**

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	322.2
6	321.4
13	319.8
18	318.3
24	317.0
30	315.4
42	312.7
51	310.2
54	309.5
60	306.8
66	306.5
72	304.3
78	302.9
84	302.0
90	300.4
96	299.4
102	298.2
108	297.2

114	296.1
120	295.0
126	293.6
132	292.6
146	290.3
150	289.5
156	288.3
162	287.4
168	286.2
174	285.3
182	284.3
187	283.6
198	281.8
204	281.0
210	280.2
216	279.6
222	278.7
228	278.0
234	277.3
240	276.5
250	275.5
264	273.9
270	273.4
280	272.3
290	271.4
300	270.4
310	269.7

320	268.8
330	267.9
340	266.8
350	265.9
360	265.2
375	264.2
394	263.0
405	262.4
420	261.4
430	261.0



Para Silica gel.

T =70°C, V=6.74 m/s, H=3.0 cm

Peso de Bandeja =68.8 gr

Peso de Bandeja + SS = 228.9 gr

TBH=35°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	334.4
6	333.5
12	331.7
18	330.2
24	328.6
30	326.8
36	324.8
42	322.9
48	320.8
54	319.4
60	317.3
66	315.2
72	313.2
78	311.8
84	309.9
90	308.1
98	305.7
102	304.3
108	302.5
114	300.9
120	299.2
129	296.7
132	295.7

138	294.1
144	292.4
150	290.9
156	289.3
162	287.8
168	286.3
174	284.6
180	283.2
186	281.8
192	280.5
198	279.6
204	278.2
210	277.2
216	276.1
222	274.7
228	273.8
234	272.9
240	272.0
250	270.2
260	269.1
270	267.8
282	266.2
290	265.1
303	263.8
320	262.0
330	261.0
340	260.1
350	259.1
360	258.4

**Cuadro I.5. DATOS OBTENIDOS EN  
CORRIDAS PARA LA CEBOLLA.**

**Para Cebolla..**

**T=55 °C, V=5.92 m/s H=1.0 cm**

**Peso de Bandeja = 60.3 gr.**

**Peso de bandeja + SS = 68.4 gr.**

**TBH=28°C**

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	138.6
3	135.6
6	134.3
9	133.6
12	132.6
15	131.7
18	130.6
21	129.7
24	128.9
27	128.0
30	126.9
33	125.9
36	125.0
39	124.2
42	123.4
45	122.4
48	121.6
51	120.7
54	119.95

57	119.2
60	118.2
63	117.1
66	116.4
69	115.5
72	114.9
75	113.6
78	112.9
81	112.2
84	111.6
87	110.7
90	109.9
93	109.0
96	108.3
99	107.7
102	107.1
105	106.2
108	105.4
111	104.8
114	104.0
117	103.3
120	102.4
125	100.5
130	100.0
135	98.9
140	97.9
145	96.1
150	95.8
155	94.7

160	93.9
165	92.7
170	91.7
175	90.7
180	89.6
190	88.1
195	87.1
200	86.2
205	85.6
210	84.7
215	83.9
220	83.1
225	82.6
230	81.6
235	81.1
240	80.3
253	78.8
260	78.0
270	77.0
280	76.0
290	75.0
300	74.5
310	73.5
320	72.9
330	72.4
340	71.8
350	71.4
360	71.0

Para Cebolla.

T= 50°C, V=5.92 m/s, H=1.0 cm

Peso de Bandeja = 60.3 gr.

Peso de Bandeja + SS = 65.95 gr

TBH=28°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	119.7
5	117.3
10	116.0
15	114.6
20	112.9
25	111.8
30	110.3
35	109.1
40	107.7
45	106.5
50	105.0
55	103.8
60	102.6
65	101.4
70	100.1
75	99.4
80	97.8
85	96.7
90	95.6
95	94.5
100	93.4
105	92.2

110	91.1
115	90.0
120	88.8
125	88.0
130	86.9
135	86.2
140	85.1
145	84.3
150	83.3
155	82.5
160	81.7
165	80.8
170	80.0
175	79.1
180	78.5
192	76.9
200	75.7
210	74.8
220	73.5
230	72.7
240	71.9
250	71.1
260	70.4
270	69.7
290	68.7
300	68.3
315	67.8
330	67.5

Para Cebolla.

T= 45°C, V=5.92 m/s, H=1.0 cm

Peso de Bandeja = 60.3 gr.

Peso de Bandeja + SS = 68.6 gr

TBH=26°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	119.2
5	117.3
10	115.9
15	114.7
20	113.3
30	110.8
35	109.8
40	108.7
45	107.4
50	106.1
60	103.8
65	102.8
70	101.8
75	100.7
80	99.7
85	98.5
90	97.5
100	95.6
105	94.8
110	93.6
115	92.6

120	91.9
125	90.9
130	90.2
135	89.4
140	88.6
145	87.6
150	87.0
155	86.3
160	85.7
165	85.0
170	84.3
175	83.7
180	82.9
190	81.9
200	80.9
212	79.7
221	78.8
230	78.0
240	77.2
251	76.4
260	75.8
270	75.2
280	74.6
290	74.0
300	73.4
315	73.0
330	72.2
345	71.5
360	71.2

**Para Cebolla.**

T= 55°C, V=6.74 m/s, H=1.0 cm

Peso de Bandeja = 60.3 gr.

Peso de Bandeja + SS = 65.75 gr

TBH=29°C

Tiempo (min)	Peso 1(gr)
0	117.6
5	115.7
10	113.5
15	111.7
20	109.8
25	108.3
30	106.3
35	104.7
40	103.1
45	101.4
50	100.3
55	98.9
60	97.0
65	95.5
70	94.3
75	92.9
80	91.2
85	90.2
90	88.8
96	87.4
100	86.2
105	85.2

110	83.8
115	82.8
120	81.7
125	80.8
130	79.7
135	78.9
140	78.1
146	77.1
150	76.4
155	75.8
160	75.2
165	74.6
170	74.0
175	73.4
180	73.0
190	72.0
200	71.2
210	70.6
220	69.9
230	69.5
240	69.0
250	68.7
260	68.3
270	68.2
280	67.9
290	67.6
300	67.4
310	67.2
320	67.1

330	67.0
340	66.9
350	66.8
360	66.7
370	66.5
380	66.4
390	66.3
400	66.3

**Para Cebolla.**

T= 50°C, V=6.74 m/s, H=1.0 cm

Peso de Bandeja = 60.3 gr.

Peso de Bandeja + SS = 68.0 gr

TBH=28°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	119.1
5	115.6
10	114.1
15	112.0
20	110.7
25	109.6
30	108.9
35	106.9
40	105.2
45	103.5
50	102.5
55	101.3
60	100.3
65	99.3
70	98.3
75	96.8
80	95.8
85	94.7
90	93.6
95	92.4
100	91.3

105	90.2
110	89.2
115	88.4
120	87.5
125	86.3
130	85.7
135	84.8
140	84.2
145	83.2
150	82.5
155	81.9
160	81.2
165	80.6
170	79.2
175	79.3
180	78.7
190	77.7
195	77.2
200	76.6
205	76.2
210	75.9
215	75.6
225	74.9
235	74.2
240	73.8
250	73.4
260	72.8
270	72.4
280	72.0

290	71.7
300	71.4
310	71.2

**Para Cebolla.**

T= 45°C, V=6.74 m/s, H=1.0 cm

Peso de Bandeja = 60.3 gr.

Peso de Bandeja + SS = 64.50 gr

TBH=27°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	120.2
3	119.7
6	118.6
9	117.8
12	116.9
15	116.3
18	115.5
21	114.8
24	114.0
27	113.2
30	112.5
33	111.8
36	111.1
39	110.3
42	109.8
45	108.7
48	108.2
51	107.6
54	106.8
57	106.0
60	105.4

63	104.7
66	104.0
69	103.3
72	102.6
75	101.6
78	101.3
81	100.4
84	100.0
87	99.6
90	99.0
93	98.5
96	97.8
99	97.2
102	96.6
105	96.0
108	95.6
111	94.9
114	94.4
117	93.7
120	92.3
130	91.2
135	90.4
140	89.3
145	88.4
150	87.6
155	86.7
160	86.0
165	84.8
170	84.1

175	83.1
180	82.5
185	81.5
190	80.9
195	80.0
200	79.2
205	78.6
210	77.9
215	77.0
220	76.6
225	75.8
230	75.3
235	74.5
240	74.1
250	73.0
260	71.9
270	71.1
280	70.2
290	69.5
300	68.9
310	68.3
320	67.8
330	67.4
340	66.9
350	66.7
360	66.4

**Para Cebolla.**

T= 55°C, V=5.92 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr.

Peso de Bandeja + SS = 73.2 gr

TBH=28.5°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	150.7
5	149.0
10	147.3
15	145.8
20	144.1
25	142.3
30	140.6
35	138.8
40	137.3
45	135.6
50	134.0
55	132.4
60	130.8
65	129.5
70	128.0
75	126.7
80	125.1
85	123.6
90	122.3
95	120.8

100	118.4
110	117.2
115	115.8
121	114.0
132	111.2
140	109.6
150	107.1
160	105.0
170	103.0
180	101.0
190	99.0
200	97.1
210	95.5
220	92.8
230	91.5
240	90.1
245	89.7
250	88.8
255	88.0
260	87.2
265	86.8
270	86.1
275	85.3
280	84.6
285	84.0
290	83.4
295	82.8
300	82.4
305	81.7

310	81.2
315	80.6
320	80.2
330	79.3
335	78.9
340	78.3
345	78.0
350	77.3
355	76.2
360	76.7
370	75.9
380	75.6
390	75.0



Para Cebolla.

T= 50°C, V=5,92 m/s, H=1,5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr.

Peso de Bandeja + SS = 73.8 gr

TBH=29°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	146.2
3	145.4
6	144.6
9	143.7
16	141.5
18	141.1
21	140.2
24.5	139.2
27	138.5
31	137.4
36	135.9
47	132.8
51	131.9
55	130.7
60	129.2
66	127.5
70	126.4
77	125.2
80	124.0
84	123.0
89	121.7

94	120.3
99	118.8
104	117.4
109	116.0
114	114.9
120	113.2
132	111.8
138	110.1
144	108.6
150	106.8
160	104.5
170	101.8
180	100.1
190	98.0
200	95.8
210	94.0
220	92.0
230	90.0
240	88.7
245	87.8
250	86.9
255	86.2
260	85.2
265	84.8
270	84.0
275	83.5
280	82.7
285	82.1
290	81.4

295	80.9
300	80.4
305	79.7
309	79.5
312	79.3
315	78.8
318	78.6
321	78.3
324	78.0
327	77.7
333	77.3
336	77.0
339	76.7
342	76.5
345	76.2
348	75.8
351	75.6
354	75.5
357	75.4
360	75.3

Para Cebolla.

T= 45°C, V=5.92 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr.

Peso de Bandeja + SS = 77.4 gr

TBH=26°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	145.4
5	142.9
10	141.8
15	140.8
20	139.4
25	138.2
30	137.0
35	135.8
40	134.5
45	133.3
50	132.5
55	131.1
60	129.9
65	128.9
70	127.8
75	126.6
80	125.5
85	124.5
90	123.4
95	122.3
100	121.1
105	120.1

110	118.8
115	118.0
120	116.9
130	115.0
140	112.7
150	110.9
162	109.1
172	107.0
182	105.4
190	104.2
201	102.1
210	100.5
220	99.7
230	98.2
240	97.1
245	95.4
250	94.8
255	94.2
275	91.9
280	91.6
285	91.0
290	90.5
295	90.0
300	89.1
305	88.7
310	88.1
315	87.8
320	87.3
325	86.7

330	86.6
335	86.1
340	86.0
345	85.6
350	84.9
355	84.6
360	84.2
375	83.1
390	82.2
405	81.2
420	80.0

Para Cebolla.

T= 55°C, V=6.74 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr.

Peso de Bandeja + SS = 79.7 gr

TBH=28°C

Tiempo (min)	Peso (gr)
0	159.5
5	157.2
10	155.8
15	153.7
20	151.8
25	150.5
30	149.0
35	147.4
40	145.8
52	142.3
55	141.4
60	139.8
65	138.5
70	137.1
75	135.4
80	134.3
85	132.9
90	131.5
95	130.2
100	129.0
105	127.9

110	126.9
115	125.5
123	123.3
130	121.8
140	119.4
150	117.2
160	115.1
170	113.0
180	110.4
190	108.2
200	106.7
210	104.5
220	102.6
230	100.8
240	99.2
245	98.4
250	97.6
255	96.5
260	95.8
265	94.8
270	94.1
280	92.5
285	91.8
290	90.9
295	90.3
300	89.5
310	88.2
315	87.4
320	86.5

325	85.9
330	85.3
335	84.6
340	83.9
345	83.3
350	83.0
355	82.4
360	81.8

**Para Cebolla.**

T= 50°C, V=6.74 m/s, H=1.5 cm

Peso de Bandeja = 62.6 gr.

Peso de Bandeja + SS = 75.3 gr

TBH=29°C

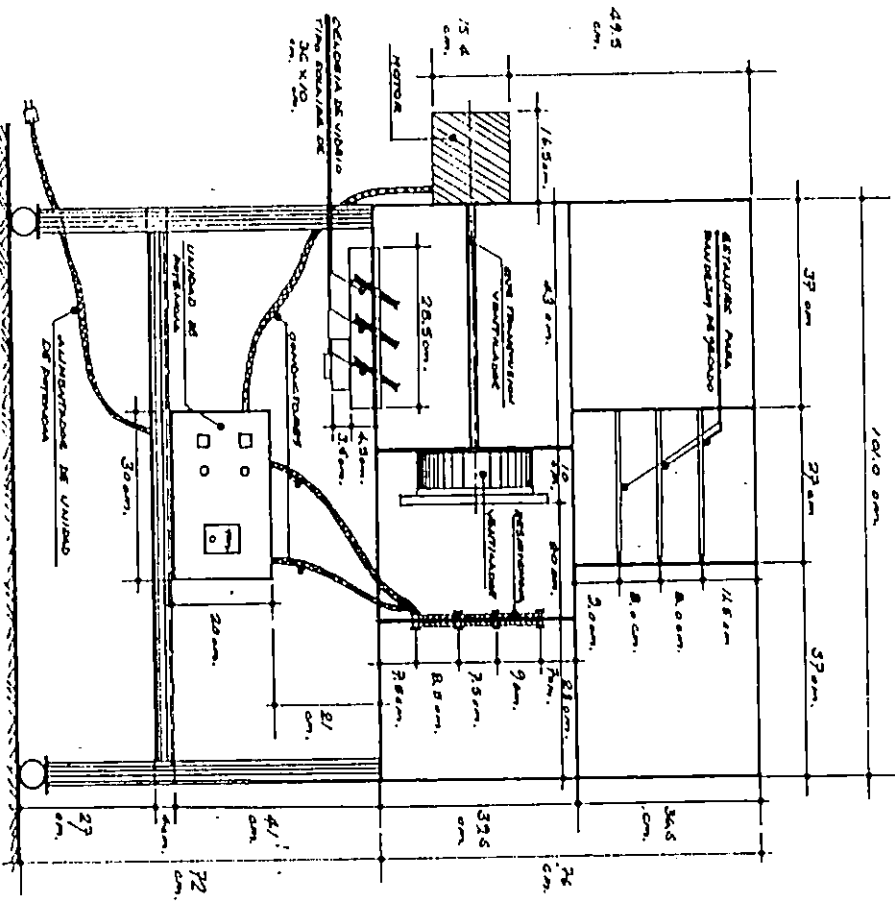
Tiempo (min)	Peso (gr)
0	145.4
5	144.4
10	143.3
15	142.1
20	140.6
25	139.5
30	138.3
35	137.1
40	135.5
45	134.7
50	133.2
55	131.8
60	130.2
65	129.0
70	128.0
77	126.0
80	125.3
85	124.1
90	122.5
95	121.5
100	120.4
105	119.1

110	118.1
115	117.0
120	115.9
130	113.5
141	110.1
150	109.3
160	106.7
170	104.8
180	102.8
190	100.2
200	99.1
215	96.9
224	95.4
250	91.3
255	90.2
260	89.8
270	88.2
275	87.7
280	87.0
290	85.8
295	85.1
300	84.7
303	84.5
306	84.1
309	83.9
312	83.5
315	83.2
318	83.1
321	82.6

324	82.4
327	82.1
330	81.7
333	81.6
339	81.2
342	80.8
345	80.7
348	80.5
354	80.0
357	79.9
360	79.8
370	78.9
380	78.6

ANEXO VI

Fig. 1.7. Vista frontal de Distribución de Elementos para el secador al nivel piloto



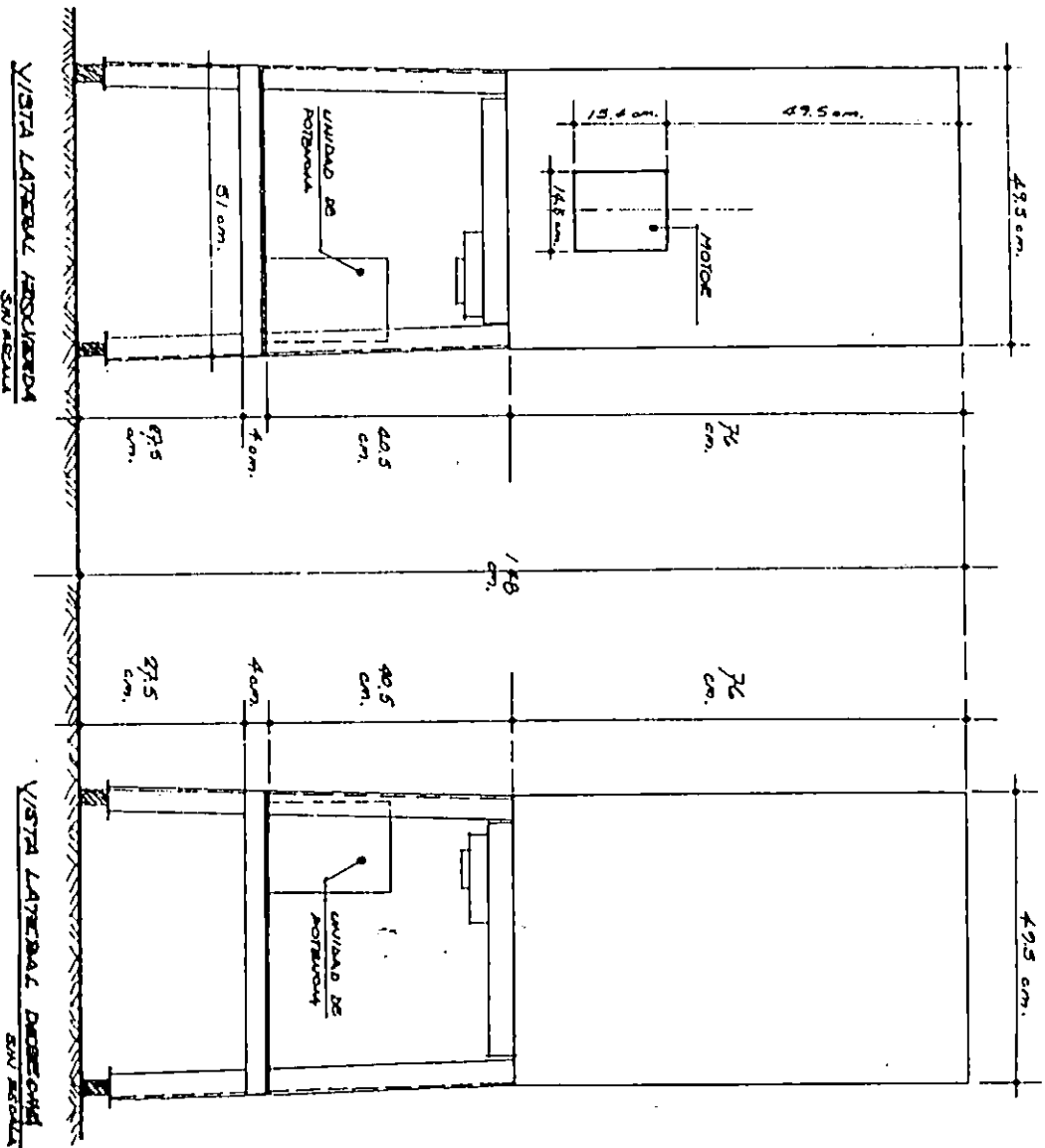
VISTA FRONTAL

SIN ESCALA

<p>UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA          ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</p>	<p>TITULO DE GRADUACION:          "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE          CHAROLAS POR LOTES A NIVEL DE PLANTA PILOTO".</p>	<p>FECHA:          24 DE ENERO DE 2000</p>
<p>CONTENIDO:          DIAGRAMA GENERAL DE DISTRIBUCION          DE ELEMENTOS PARA SECADOR DE CHAROLAS</p>	<p>PRESENTAN:          FREDDY ALEXANDER CRUZ          JUAN ANTONIO MENDEZ          FRANCISCO ARTURO SOTO</p>	<p>ESCALA:          SIN ESCALA</p>



Fig. I.8. Vistas laterales del secador al nivel de planta piloto.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

TITULO DE GRADUACION:  
 "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE  
 CHAROLAS POR LOTES A NIVEL DE PLANTA PILOTO".

FECHA:  
 24 DE ENERO DE 2000

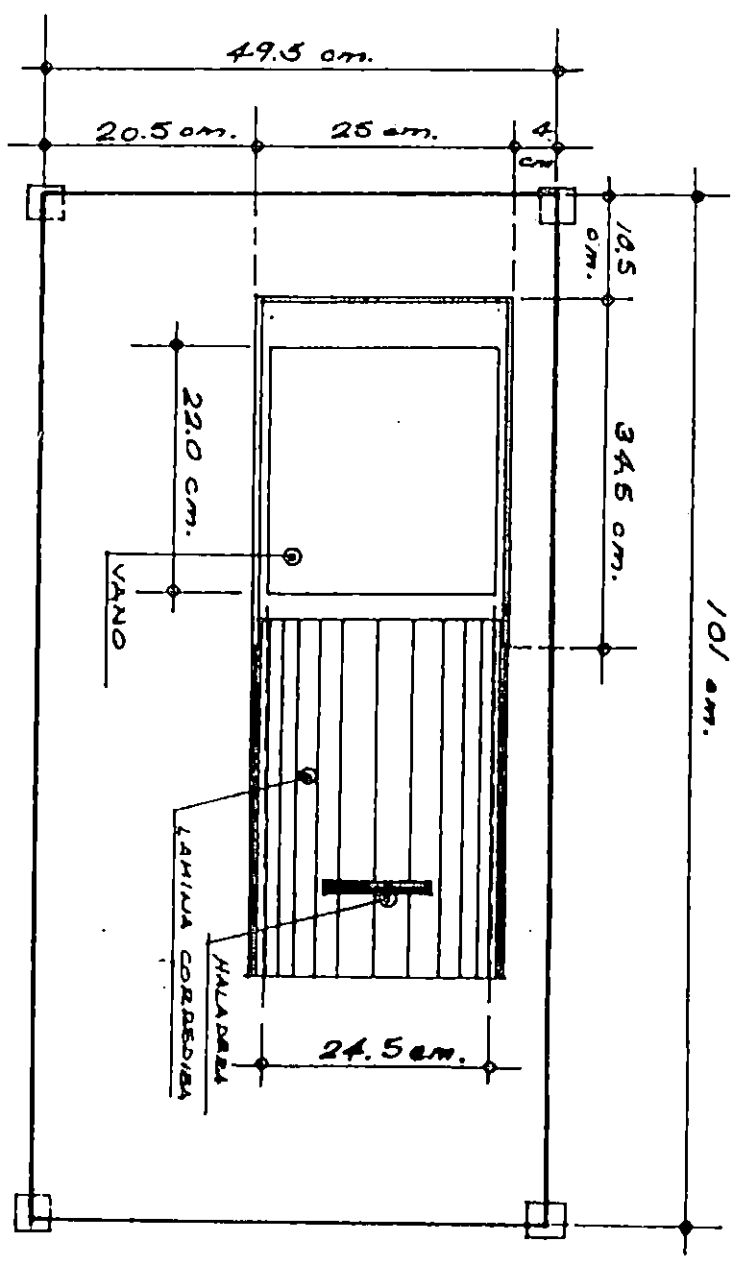
CONTRATO:  
 DIAGRAMA GENERAL DE DISTRIBUCION  
 DE ELEMENTOS PARA SECADOR DE CHAROLAS

PRESENTAN:  
 FREDDY ALEXANDER CRUZ  
 JUAN ANTONIO MENDEZ  
 FRANCISCO ARTURO SOTO


ESCALA: SIN ESCALA



Fig. 19. Vista Superior del secador al nivel de planta piloto.



VISTA SUPERIOR  
SIN ESCALA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA	TITULO DE GRADUACION: "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE CHAROLAS POR LOTES A NIVEL DE PLANTA PILOTO".	FECHA: 24 DE ENERO DE 2000	
CONTENIDO: DIAGRAMA GENERAL DE DISTRIBUCION DE ELEMENTOS PARA SECADOR DE CHAROLAS	PRESENTAN: FREDDY ALEXANDER CRUZ JUAN ANTONIO MENDEZ FRANCISCO ARTURO SOTO	ESCALA: SIN ESCALA	