

1135  
2011



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

TECNICAS Y ESTIMACIONES DE PARAMETROS  
MEDIBLES PARA EL SECADO DE MATERIALES  
INORGANICOS, EN UN SECADOR INTERMITENTE  
DE CHAROLAS PARA UN LABORATORIO DE  
INGENIERIA QUIMICA.

T E S I S

Que para obtener el Título de  
INGENIERO QUIMICO

presenta

**JUAN GILBERTO GARCIA TORRES**



México, D. F.

1992

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INDICE ANALITICO \_\_\_\_\_ 1

PROLOGO \_\_\_\_\_ 4

GENERALIDADES \_\_\_\_\_ 7

CAPITULO I

SIMBOLOS, UNIDADES Y DEFINICIONES \_\_\_\_\_ 13

CAPITULO II

EVOLUCION DE LOS PROCESOS DE SECADO. \_\_\_\_\_ 19

CAPITULO III

CLASIFICACION GENERAL DE LOS SECADORES \_\_\_\_\_ 25

CAPITULO IV

FACTORES PARA LA CLASIFICACION DE LOS SECADORES. \_\_\_\_\_ 32

CAPITULO V

FENOMENOS OBSERVADOS EN EL SECADO DE SOLIDOS  
( Variables externas e internas) \_\_\_\_\_ 40

CAPITULO VI

EQUIPOS UTILIZADOS EN LA OPERACION DE SECADO \_\_\_\_\_ 50

CAPITULO VII

DESCRIPCION DEL APARATO \_\_\_\_\_ 68

**CAPITULO VIII**

**PARTE PRACTICA:**

**ANALISIS, APLICACION Y EXPERIMENTACION** \_\_\_\_\_ **75**

**CAPITULO IX**

**CONCLUSIONES** \_\_\_\_\_ **94**

**BIBLIOGRAFIA** \_\_\_\_\_ **99**

## INDICE ANALITICO

### Prefacio

### Generalidades

#### CAPITULO I.

Simbolos, unidades y definiciones., humedad base humeda, humedad base seca, humedad de un sólido, humedad de equilibrio del sólido, humedad crítica, humedad libre, humedad ligada, inherente (bound)., humedad no ligada, superficial (Unbound)., humedad absoluta por ciento, calor húmedo, difusión interna, distribución inicial de la humedad, material higroscópico, material no higroscópico, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de condensación, volumen húmedo.

#### CAPITULO II.

Evaluación y adelantos al secador de charolas., Evolución de los procesos de secado; H. Mc Cormak, A.S. Foust, L.A. Wenzel, C.W. Clump, Walter, Lapple y Clarck, O.T. Zimmermann, Krischer, Kroll, Allerton, Brownell, Kat y Beavens.

#### CAPITULO III.

Clasificación general de los secadores., Secadores Directos, Secadores indirectos., Secadores continuos, Secadores intermitentes. tabla clasificatoria de los secadores en base a su método de operación.

#### CAPITULO IV.

Factores para la clasificación de secadores. condiciones de proceso, condiciones de alimentación, tiempos de residencia, tabla clasificatoria de los secadores en base a la forma física de la alimentación., tabla clasificatoria de los secadores por su escala de producción., tabla clasificatoria de los secadores segun su conveniencia para casos especiales.

#### CAPITULO V.

Fenómenos observados en el secado de sólidos (Variables externas e internas)., comportamiento general de secado (interpretación de gráficos de las curvas típicas de secado), velocidad decreciente, regimen no permanente, humedad de equilibrio, flujo capilar, difusión molecular., variables externas: Conducción, Convección y Radiación., Ley de Stefan Boltzman. Transferencia de masa (condiciones internas y externas), mecanismo interno de flujo de líquido.

#### CAPITULO VI.

Equipos utilizados en la operación de secado.- Secadores de compartimiento, secadores de compartimiento al vacío, secadores rotativos, secador Roto-Louvre, turbo secadores, cilindros secadores, secador de feston, secador agitado mecanicamente, secador por atomización, secadores de tambor, secadores rotatorios., etc.

**CAPITULO VII.**

Descripción del aparato de secado., manejo y uso del secador de charolas.

**CAPITULO VIII.**

Parte práctica: Analisis, aplicación y experimentación., calculo del tiempo de secado, período de velocidad constante., procedimiento experimental, calculos y resultados. Tabla de resultados., gráficas: Peso de la muestra vs. tiempo., contenido de humedad base seca vs. tiempo., velocidad de secado vs. tiempo., velocidad de secado vs. humedad base seca

**CAPITULO IX.**

Conclusiones.- efectos de las variaciones de las condiciones de secado durante el secado., campo de aplicación, limitaciones del tratamiento teórico, efecto de la temperatura y de la humedad., efectos de la velocidad del gas de secado., efecto del espesor de la torta., sugerencias.

**Bibliografía.**



## P R O L O G O

La operación de Secado involucra transferencia de calor y masa., La transferencia de Calor trae consigo los fenómenos de Conducción, Convección, Radiación ó en casos relaciones entre ellas.- Para la transferencia de masa se dan dos fenómenos esencialmente: La Difusión y la Capilaridad que, conjuntamente se dan a través del material hacia la superficie y por último al aire.

Un gran número de procesos de fabricación de materiales granulados involucran la operación de secado., el equipo usado en éstas operaciones industriales depende del proceso particular y del tipo de material a secar, por ejemplo: los requerimientos usados para el procesamiento de materiales alimenticios son en su totalidad más estrictos que en los usados en los materiales fertilizantes, así el diseño de secadores para éstos propósitos estará determinado por la relativa importancia de la sensibilidad al calor, porosidad, densidad aparente, características corrosivas durante el proceso de secado, tamaño de la partícula, acomodo de ésta, etc.

Los fenómenos de transferencia se presentan en las operaciones de secado, destilación, absorción, flujo de fluidos, extracción, evaporación, acondicionamiento de aire, etc. La Operación de Secado es de importancia su enseñanza en el laboratorio de Ingeniería química, permite observar con lujo de detalle los fenómenos de transferencia de masa y calor en una sola operación.

La operación unitaria de secado está muy conectada con los sistemas Aire-Agua, la cual es diferenciable de ellas por la adición de una fase sólida. Para concretar en base a este análisis y familiarizar al profesionista químico en esta operación unitaria definiremos al proceso de secado como la eliminación de un líquido (generalmente agua) de un sólido húmedo hasta que la cantidad



de líquido en el sólido tengan un valor deseado.

Existen además del secado otras operaciones que tienen funciones semejantes, estas son: La Evaporación, Filtración y la Centrifugación. Diferenciaremos la Operación de Secado con éstas otras en los capítulos a venir.

**GENERALIDADES**

## GENERALIDADES

Se ha dado en forma introductoria las operaciones que acarrear tanto transferencia de masa como de calor, la transferencia de masa la utilizamos para separar los componentes de una solución, lograndose por el contacto directo de la solución con otra no soluble. Es importante mencionar que la transferencia de masa se da a través de un coeficiente de rapidez y también del grado de desviación del sistema de equilibrio, el coeficiente dependerá por la rapidez con que se transfiera un componente de una fase a otra, el grado de desviación del sistema de equilibrio dependera de las condiciones de equilibrio esto es, cuando las condiciones de equilibrio se hayan alcanzado, el grado de desviación sera nulo y por lo tanto la transferencia habrá terminado. Ahora bien, estos coeficientes de rapidez en una fase dada son diferentes entre sí, pero donde exista la di fusión molecular su diferencia será mayor, esta diferencia no es en grado amplia, los gases o vapores que se difunden a través del aire presentan relaciones aproximadas a las sustancias que se difunden en el agua líquida, esto es soluciones coloridas entre otras, que van del orden aproximado de 4 a 1.

¿Cuándo podrían ser parecidos estos coeficientes?, existen casos de turbulencia, aquí la difusión molecular y la viscosidad pasan a segundo término, ya que las medidas se llevan a cabo no cerca de las paredes del tubo, esto influye grandemente para que los coeficientes de transferencia se vuelvan parecidos para todos los componentes, es claro cuando la difusión molecular es de poca importancia., no obstante estos coeficientes de tra nsferencia de masa son tan importantes, ya que cuando es regulada la rapidez y alcanzada con esto el equilibrio, podemos hacer control tanto del tiempo que se requiere para la separación co mo del diseño del tamaño del equipo.

Para seguir hablando del coeficiente, tenemos el de transferencia de calor, este coeficiente es calculado a partir de la suma de los coeficientes individuales de transferencia de calor, es importante que el coeficiente global de transferencia de calor para determinarlo correctamente lleve una serie de pasos que hemos de encontrar en cualquier proceso de secado, ya que en su mayoría o en los más comunes involucran encuentros de aire-vapor, estos son:

- TRANSFERENCIA DEL VAPOR EN CONDENSACION, A TRAVES DE UNA CAPA DE CONDENSADO, A LA PARED INTERNA DEL TUBO CALENTADOR.
- CONDUCCION A TRAVES DE LA PARED METALICA DEL TUBO DE LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL TUBO Y A LAS ALETAS (CONCRETAMENTE AL EQUIPO QUE UTILIZAMOS).
- CONVECCION DE LA PARED EXTERNA DEL TUBO A LA CORRIENTE DEL AIRE.

Cada uno de estos tres pasos es caracterizado por un coeficiente individual de transferencia de calor, y en general esta relacionado al coeficiente global de transferencia de calor "U", por la relación:

$$1/U = 1/h_s + X/k + 1/h_a$$

donde:

- h<sub>s</sub> = coeficiente del lado del vapor en condensación
- X = espesor de la pared del tubo
- k = conductividad térmica del material del tubo
- h<sub>a</sub> = coeficiente de película del lado del aire

Sin embargo esta ecuación como lo veremos más adelante sólo podrá ser aplicada cuando el área de la superficie interna y externa del tubo es aproximadamente la misma.

Para seguir el término del Secado es una generalidad que antecede de varias operaciones que presentan los mismos principios como, la reconcentración de una solución cualquiera por medio de la evaporación del agua, el escurrimiento de un material para un nivel de humedad aceptable, o también que ese mismo material pueda presentar diferentes porcentajes de humedad para tratamientos posteriores, todos estos principios los dan las operaciones como, la deshidratación, la filtración, la evaporación, la deshumidificación y la centrifugación, para el tratado nuestro que es el secado de sólidos inorgánicos es de interés saber de que forma será posible poder utilizar cualquiera de estas operaciones, que como ejemplo la filtración en caso específico es la más recomendada, nos disminuiría el gasto del secado, ésta operación mecánica es antecedida por otra operación cualquiera, la cual nos da el producto para escurrirlo ó en nuestro caso filtrarlo. La Filtración es un proceso mecánico de escurrimiento de cualquier líquido que sature un sólido, ésta definición vaga es tomada de acuerdo al proceso de secado, y también ligada al ahorro económico, de aquí que el secado pueda llevarse a cabo en forma rápida y económica como es el ahorro de energía eléctrica, térmica y de operación que encierra lo anterior.

Para el caso de la deshidratación es otra operación que liga con el secado, pero está relacionado directamente al secado de materiales orgánicos., como alimentos seacarnes, frutas ó conservas. La Deshidratación concretamente realiza la privación de agua y por tanto es un sinónimo de nuestro tema.

La Evaporación es en este caso difícil de tratar minuciosamente, la razones son las que todo Ingeniero a enfrentado y la resumimos como:

- La reconcentración de un sólido disuelto en solución, el cálculo de los efectos requeridos para su concentración final y por último la operación de éste.

Nosotros nos concretaremos en decir que es necesaria ya que - por medio del paso del líquido al vapor, existe un concentrado cualquiera, que después por otros tratamientos recuperaremos - sea en su forma líquida o sólida.

La operación se da en cualquier líquido y es característica por presentar cambio de fase

En el caso de la centrifugación solamente hay que hacer mención sobre su eficacia para la separación de cantidades de sólidos no disueltos de líquidos, cuando las partículas son de tamaño determinado es posible llevarlas al secado.

Es interesante observar que existen procesos semejantes que anteceden al secado, ahora trataremos otro punto importante, daremos clasificación concreta de los secadores tomando la referencia el tipo de proceso utilizado: CONTINUO O INTERMITENTE

#### SECADORES:

- |                 |                   |  |
|-----------------|-------------------|--|
| 1) CONTINUOS    | Tambor            | - Presión atmosférica<br>- Al Vacío  |
|                 | Túnel             | - Flujo en paralelo y a contracorriente  |
|                 | Rotatorios        | - Flujo paralelo<br>- Flujo a contracorriente<br>- Flujo invertido<br>- Al Vacío       |
|                 | De rociado        | - Presión Atmosférica por: Aire Caliente<br>Vapor de agua Sobrecalentado<br>- AL Vacío |
| 2) INTERMITENTE | De Almacen        |  |
|                 | De Compartimiento | - Cámara<br>- Gabinete   |

Para la intermitencia en el secado, ésta es llevada a cabo - colocando la carga en la estructura donde deberá quedar ahí, hasta que ocurra su secado. El calor transferido al material húmedo se realiza por conducción a través de la pared metálica. Ahora bien para el secado continuo la transmisión del calor es directamente del medio calentante (gas) al sólido húmedo, la explicación detallada se hará en los últimos capítulos.

Solamente a modo de detalle para el secado de cualquier sólido, se presentan dos pasos fundamentales:

- TRANSMISION DE CALOR PARA LA EVAPORACION DEL LIQUIDO Y/O VAPOR DENTRO DEL SOLIDO
- Y COMO VAPOR DESDE LA SUPERFICIE HUMEDA.

Estos procesos son llevados a cabo a razon del secado sea en un material orgánico o un inorgánico ya que el proceso es simultaneo.

## **CAPITULO I**

### **SIMBOLOS, UNIDADES Y DEFINICIONES**



## CAPITULO I

## SIMBOLOS, UNIDADES Y DEFINICIONES

## HUMEDAD BASE HUMEDA.

Expresa el contenido de humedad de un material en porcentaje en peso de sólido húmedo:

$\text{Kg de agua} / \text{Kg de sólido seco} + \text{Kg de agua}$

No es recomendable el uso de porcentaje en peso en base húmeda ya que el cambio de humedad no es constante, para todos los niveles de humedad. Cuando queremos expresar contenido de humedad, utilizando el porcentaje en peso en base húmeda, un 2 ó 3 % de cambio a altos contenidos de humedad representa un 15 a 20 % en cambio de carga de evaporación.

## HUMEDAD BASE SECA.

Expresa el contenido de humedad de un sólido húmedo en Kg de agua por Kg de sólido completamente seco (cuando este sale del secador). Es recomendable, por la ventaja que tiene el uso de esta base de obtener la cantidad de la pérdida de humedad con sólo restar el contenido de humedad antes y después del SECADO.

## HUMEDAD DE UN SOLIDO.

Expresa el peso de agua que acompaña a la unidad de peso del sólido seco. Se expresa generalmente por la cantidad de humedad por unidad de peso ó de volumen del sólido seco o húmedo.

## HUMEDAD DE EQUILIBRIO DEL SOLIDO.

Límite al cual un determinado material puede ser secado bajo condiciones específicas de aire, temperatura y humedad.

Esta humedad es alcanzada cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire. La humedad se explica, alcanzada por el sólido en equilibrio con el aire en las condiciones --prevalecientes.

**HUMEDAD CRITICA.**

Es el promedio de humedad contenido cuando termina el período de velocidad constante. Más allá de éste punto disminuye la velocidad de secado y aumenta la temperatura de la superficie.

**HUMEDAD LIBRE.**

Humedad contenida de una muestra por encima del contenido en humedad de equilibrio. Puesto que el contenido en humedad de equilibrio es el límite hasta el que puede secarse un material bajo una serie de condiciones determinadas, la humedad que contenga por encima de éste punto, es la humedad que puede extraerse por el proceso de secado, más no el contenido total de humedad.

Este contenido de líquido no se puede extraer a la temperatura y humedad determinadas; puede incluir la humedad ligada y la no ligada.

**HUMEDAD LIGADA, INHERENTE (Bound).**

Es el líquido que contiene el sólido que produce una presión de vapor menor que la del líquido puro a la misma temperatura. El líquido está ligado por retención en capilares pequeños, por solución en paredes celulares ó de fibras, por solución homogénea en todo el sólido y por absorción química o física sobre superficies sólidas. Esta humedad sólo puede expulsarse en determinadas condiciones de humedad del medio exterior.

**HUMEDAD NO LIGADA, SUPERFICIAL (Unbound).**

Humedad de un material higroscópico, es la humedad que hay en exceso en contenido de humedad en equilibrio correspondiente a la saturación. Toda el agua de un material no higroscópico es humedad no ligada.

**HUMEDAD ABSOLUTA PORCIENTO.**

Relación que existe entre la humedad absoluta actual y la humedad de saturación del sistema a la misma temperatura.

**CALOR HUMEDO.**

Cantidad de calor necesario para elevar en un grado una unidad de peso de aire más la humedad que contiene.

**DIFUSION INTERNA.**

Fenómeno de una sola fase., la difusión interna por tanto tiene que producirse de sólido a través de sólido, líquido a través de líquido ó gas a través de gas.

La Difusión Interna se produce cuando la fase que se mueve -- obedece las leyes fundamentales de la difusión.

**DISTRIBUCION INICIAL DE LA HUMEDAD.**

Término que es referido a la distribución de la humedad en un sólido al principiar el secado.

**MATERIAL HIGROSCOPICO.**

Sustancia que contiene agua ligada ó combinada que ejerce una presión de vapor menor que la del agua líquida a la misma temperatura.

**MATERIAL NO HIGROSCOPICO.**

Es la sustancia que no puede contener nada de humedad ligada.

**TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.**

Es la temperatura real del aire húmedo ó seco.

**TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.**

Es la temperatura que adquiere el agua cuando se evapora espontáneamente en el seno de una gran cantidad de aire.

La temperatura de bulbo húmedo es igual ó menor que la del bulbo seco, nunca puede ser mayor. Es igual cuando el aire está saturado.

**TEMPERATURA DE CONDENSACION., Saturación ó Punto de Rocío.**

Es la temperatura a la cual una determinada mezcla de vapor de agua y aire está saturada. La temperatura de condensación es igual ó menor a la temperatura de bulbo húmedo. En la saturación las tres temperaturas son iguales.

**VOLUMEN HUMEDO.**

Es el volumen que ocupa una unidad de peso de aire seco más la humedad que contiene.

## SIMBOLOGIA Y UNIDADES.

A	Superficie total para la transmisión de calor expuesta al material húmedo (ft <sup>2</sup> )
c <sub>s</sub>	Calor específico del aire húmedo (BTU/lb de aire seco °F)
D <sub>p</sub>	Diámetro medio de la partícula (ft)
D <sub>v</sub>	Difusividad del líquido evaporado (ft <sup>2</sup> /hr)
ε	Emisividad de la superficie que recibe la radiación
G	Masa velocidad del aire seco (lb/hr ft <sup>2</sup> )
H <sub>a</sub>	Humedad del aire seco ó ambiental (lb/lb de aire seco)
h <sub>c</sub>	Coefficiente de transmisión de calor por convección (BTU/hr ft <sup>2</sup> °F)
h <sub>r</sub>	Coefficiente de transmisión de calor por radiación (BTU/hr ft <sup>2</sup> °F)
H <sub>s</sub>	Humedad de saturación del aire a la temperatura de la superficie que se seca (lb/lb de aire seco)
h <sub>t</sub>	Coefficiente de transmisión de calor de calor (BTU/ft <sup>2</sup> hr°F)
AH <sub>m</sub>	Media logaritmica de la fuerza impulsora de la humedad a la entrada y a la salida
H <sub>w</sub>	Humedad saturada a la temperatura t <sub>w</sub> (lb/lb de aire seco)
k'g	Coefficiente de transferencia de masa (Kg/hr ft <sup>2</sup> atm)
k	Conductividad calorífica de la mezcla gaseosa (BTU/hrft <sup>2</sup> (°F/ft))
h <sub>m</sub> , h <sub>w</sub> , h <sub>p</sub>	Coefficientes de transmisión del calor del medio calentante empleado de la pared metálica, y de la pared al producto húmedo respectivamente (BTU/hr ft <sup>2</sup> °F)
L	Espesor del sólido seco (ft) material que se seca
ρ	Densidad del sólido seco (lb/ft <sup>2</sup> )
λ	Calor latente de evaporación a la temperatura t <sub>s</sub> (BTU/lb)
μ	Viscosidad del material húmedo (lb/hr ft)
ρ <sub>s</sub>	Densidad del material húmedo (lb/ft <sup>2</sup> )
p <sub>a</sub>	Presión parcial del vapor de agua en el aire (atm)
p <sub>s</sub>	Presión de vapor del agua a t <sub>s</sub> , temp. de la sup. en atmósferas
q	Flujo de transmisión de calor (BTU/hr)
Q	Transmisión total de calor (BTU)
t <sub>a</sub>	Temperatura del aire (°F)
t <sub>h</sub>	Temperatura del medio de calentamiento empleado (°F)
ΔT <sub>m</sub>	Diferencia media logaritmica entre la temperatura a la entrada y a la salida de la capa a la temperatura del bulbo húmedo (°F)

- ts Temperatura del sólido que se seca ( $^{\circ}\text{F}$ )  
tw Temperatura del bulbo húmedo del aire ( $^{\circ}\text{F}$ )  
 $\theta$  Tiempo en horas, min.  
U Coeficiente total de transmisión del calor basado en la diferencia de temperatura entre el medio calentante empleado y el producto ( $\text{BTU/hr ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$ )

## CAPITULO II

### EVOLUCION DE LOS PROCESOS DE SECADO.

## EVOLUCION DE LOS PROCESOS DE SECADO.

El secado dependera en primer término del tipo de materia prima que va a someterse a desecación, sabemos que el secado de un material granulado orgánico o inorgánico es distinto al secado de un material pastoso, y éste también difiere del secado de una hoja o lámina continua, como puede ser el papel, en cada caso se han empleado aparatos y métodos diferentes.

A través de los años de experiencia han tenido nacimientos -- una gran variedad de tipos de equipos para efectuar el secado. Es común en cualquier equipo dar materiales de construcción ó dispositivos completamente diferentes que se utilizan para operaciones casi similares, únicamente por razones que en una industria se ha hecho costumbre utilizar un cierto tipo de maquinaria y en otras se emplea otro tipo diferente para el mismo objeto. Esta necesidad vaga de construcciones hace difícil la tarea de dar una evolución al proceso de secado. Por tañto la evolución expuesta se refiere a las aportaciones de autores que han impulsado el desarrollo de la teoría de secado.

Para el tratamiento de la utilización de ciertos métodos, tenemos los más usuales y comunes, entre otros podemos mencionar los siguientes: El de Calefacción., las radiaciones infrarrojas son empleadas para el secado rápido de adhesivos, pinturas, películas fotográficas, productos cerámicos, superficies metálicas, etc. Para éstos casos la transmisión de calor a los materiales se efectua principalmente por radiación utilizando lamparas caloríficas de radiación infrarroja.

El funcionamiento se sintetiza de la manera siguiente., por medio de un reflector parabólico se concentra la radiación de baja temperatura sobre el cuerpo que se quiere secar, la velocidad de transporte del calor a nuestro material es en forma más eficiente que la utilizada por convección por lo que ésta eficiencia es tangible en el secado siendo mucho más rápida.

Un método más de calefacción, es el de inducción por alta frecuencia. Este método es empleado en la actualidad con un carácter exclusivamente experimental y consiste en colocar el material entre dos electrodos metálicos, los cuales están conectados a una fuente generadora de alta frecuencia donde el material actúa como dieléctrico y se calienta por inducción. Observamos que éstos métodos son incomparables pero presentan inconvenientes para los casos de los llamados procesos tradicionales a los que haremos referencias en capítulos posteriores. Para estos métodos los materiales pueden alcanzar temperaturas elevadas, pero como la pérdida de humedad se efectúa en su mayor parte por ebullición, los fundamentos estudiados para el secado en corriente de aire no son aplicables para estos casos.

Para el caso de la calefacción indirecta, la sustancia a secar recibe el calor por contacto con una superficie de calefacción, aquí las condiciones son algo análogas al caso de conducción directa por la influencia sobre la velocidad de secado del aire que es ineficiente. Existen aparatos en los que el secado tiene lugar por contacto directo del material a secar, por medio de una corriente de aire o de gas de combustión, siendo éste permanente o no. En algunos de éstos aparatos por medio de la experimentación se ha concluido que pueden existir tanto la calefacción directa como la indirecta. Para las operaciones de secado se emplean aparatos tanto continuos como discontinuos, las ventajas relativas como adelantos pueden darse como carácter general y dependen poco de la aplicación de que se trate., para los primeros el material se desplaza con movimiento uniforme desde la entrada al secador hasta el extremo de salida, y las condiciones del aparato son constantes respecto al tiempo, por el contrario en el secador discontinuo el producto es mantenido estático aquí, las condiciones de secado con respecto al tiempo varían.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, los secadores finalmente se dividen en: Secadores Directos e Indirectos,



para concretar esta evolución de procesos de secado tanto en equipo como en procesos mencionamos que ésto ha traído consigo grandes beneficios a las compañías en ahorros de energéticos, dándose estos ahorros continuamente.

Estos estudios sobre ahorros y minimizaciones al bajo costo por unidad de masa en la actualidad es sumamente costeable, ya que existen en el mercado por ejemplo sin mencionar los secadores a base de aire/vapor, otros que utilizan como medio de calentamiento gases de combustión hidrocarbureados como mezclas binarias gas/propano/butano caracterizados por ser de baja presión.

¿Cuales son las evoluciones sobre los secadores de charolas?, respecto a este tipo de secadores, a través de los años, varios investigadores han presentado criterios sobre ventajas y desventajas de dichos secadores, entre otros investigadores tenemos., H.Mc Cormak, A.S.Foust, L.A. Wenzel y C.W. Clump, Walter, Lapple y Clarck, O.T. Zimmermann, Krischer, Kroll, Allerton, Browell, Kat y Beavens y otros. Las evoluciones entre los investigadores de acuerdo al secador de charolas con fines para uso y trabajo de laboratorio han antecedido según H.Mc Cormack (1940) quien nos explica "Es de importancia seleccionar un secador de laboratorio de tipo intermitente de gabinete, debido a su facilidad de operación como el manejo de las variables de operación. temperatura, humedad, velocidad de aire, etc.

Para su estudio así como modificados por el operador, de tal forma que pueda darle el efecto didáctico esperado!"

O.T.Zimmermann e I. Lavine (1943).- Estos investigadores nos dicen "El secado en compartimientos es una operación intermitente y sólo económico para el secado de pequeñas cantidades de material. El más práctico es el secador de compartimiento con el control de temperatura, humedad y velocidad del aire sobre la muestra.

El número de compartimientos es de poca importancia, un compartimiento es suficiente y hace más fácil el pesado de la muestra sin alterar las condiciones del secado. Ahora si se trata de flujo transversal, la muestra puede estar suspendida sea en los brazos de una balanza, la cual puede estar colocada en la parte superior de la cámara de secado, facilitando el pesado de la muestra a cualquier tiempo".

Walter, Lapple y Clarck (1955).- "Los secadores intermitentes de charolas, son de bajo costo inicial y mantenimiento bajo, fáciles de operar y extremadamente versátiles en sus posibles aplicaciones. Es conveniente su selección en aplicaciones como en el caso en que el secador este sin trabajar por periodos de tiempo relativamente largos. La facilidad y versatilidad de operación los hacen útil cuando se requieren secar varios materiales diferentes ó para cuando es utilizado en trabajos del laboratorio".

W.B. Van Arsdel y M.J. Copley (1964).- "El secador de gabinete puede estar clasificado entre los secadores de charolas intermitentes y por convección de aire, usualmente construido como una unidad independiente y encaminado a operaciones de pequeña escala. Pueden ser utilizados para secar casi cualquier tipo de material. Secadores de este tipo fueron utilizados durante la segunda guerra mundial en los Estados Unidos, para preservar cosechas de pequeñas comunidades e instituciones. El segundo uso es en el laboratorio de experimentación, en pequeña escala en la teoría y práctica del secado, y último sirve para el desarrollo de secadores a nivel comercial. En los secadores de charolas existe una gama de tamaños, desde aquellos que es posibles colocarlos sobre una mesa, hasta aquellos cuya capacidad este de una tonelada ó más de producto por ciclo".

Por último en referencia a A.S. Foust, L.A. Wenzel y C.W. Clump (1960).- nos explican "El secador de charolas es el tipo más sencillo de todos, es una cámara en la cual se coloca los materiales a secar soportados sobre charolas, se trata pues de

una unidad de producción intermitente para pequeñas cantidades. Las condiciones de secado se regulan en forma sencilla y está particularmente indicado para pruebas piloto!

De los investigadores anteriores Krischer, Kroil emplearon un equipo experimental en el cual se consideraban la transferencia de calor por Conducción, Convección, Radiación y combinaciones entre ellas., algunos emplearon como medio de calentamiento del aire, bancos aletados de vapor, serpentines así como otra base de gases de combustión.

Para el caso de flujo transversal, E.A. Beavens recomienda usar una charola arriba y otra abajo de la que se pesa con una separación entre ellas similar a la empleada en secadores industriales, con ello los datos se ligan más a las determinaciones de equipos mayores.

Así en la actualidad y en cualquier empresa donde se fabrica manufacturas de materiales donde utilizan técnicas de secado muy avanzadas, éstas fueron complementadas por el gran esfuerzo y estudio de estos personajes que han dejado quizás los cimientos correctos para cualquier diseño posterior.

En las épocas actuales de los 90's se han llegado a técnicas tan modernas de secado que difícilmente y casos únicos podríamos mencionar no fuera sido utilizada la técnica apropiada para el secado de ese material.

## CAPITULO III

### CLASIFICACION GENERAL DE LOS SECADORES

#### CLASIFICACION GENERAL DE LOS SECADORES.

Existen una diversidad de equipos para el secado (ver ref. - equipos utilizados en la operacion de secado), cada uno de ellos presentan modos peculiares de manejo y funcionamiento, por ejemplo., Tipo de servicio, condiciones de alimentación, sensibilidad al calor, métodos de transferencia de calor y - por último su tiempo de residencia.

Una forma muy común para su clasificación son éstos conceptos arriba tratados y su forma de funcionar. Cabe aclarar que los conceptos son la base única para su clasificación y por tanto tenemos:

- DE ACUERDO A LA FORMA DE TRANSFERIR CALOR HACIA EL MATERIAL
  - 1) SECADORES DIRECTOS
  - 2) SECADORES INDIRECTOS
- DE ACUERDO A LAS CARACTERIZICAS FISICAS Y DE MANEJO DEL MATERIAL A SECAR
  - 3) SECADORES CONTINUOS
  - 4) SECADORES INTERMITENTES

##### Detalle: SECADORES DIRECTOS

La transferencia de calor para el secado del material, se -- lleva a cabo por contacto directo entre el sólido húmedo y - los gases calientes. El líquido vaporizado es retirado por medio de la misma corriente de gases calientes. Los Secadores Directos también pueden llamarse Secadores por Convección.

##### Detalle: SECADORES DIRECTOS CONTINUOS

La operación es continua sin interrupción a medida que se alimenta el material húmedo, hacemos incapie en este renglon - que a medida que alimentamos de material húmedo a secar éste tipo de secador continuo también puede trabajarse en forma intermitente se así se quisiera, entre estos tenemos los siguientes:

- SECADORES CONTINUOS DE CHAROLAS, de los cuales tenemos como ejemplo: de charolas vibratorias, de bandas metálicas -

continuas., etc.

detalle: SECADORES CONTINUOS DE HOJAS

La hoja continua de material, pasa a través de la cámara de secado en dos formas: a) COMO LISTONES ó COMO HOJA TIRANTE en un marco.

detalle: SECADORES DE TRANSPORTE NEUMATICO

El material es conducido a altas temperaturas y velocidades de gases a un ciclón colector.

detalle: SECADOR ROTATORIO

El material es conducido y se deja caer dentro de un cilindro rotatorio, en el cual circulan los gases calientes.

detalle: SECADORES DE TUNEL

El material es colocado sobre carrillos los cuales son los que transportan el material a lo largo del túnel y éstos es tan en contacto continuo dentro del túnel con los gases de calentamiento.

detalle: SECADORES POR PULVERIZACION

El material a secar debe ser pulverizado, bién sea por un disco centrífugo a muy alta velocidad ó por medio de boquillas pulverizadoras.

detalle: SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO

El material es conducido a través de una malla continua y el aire caliente pasa a través del material .

detalle: SECADORES CONTINUOS INTERMITENTES

Estos tipos de secadores estan diseñados para trabajar con un definido tamaño de material húmedo para cada paso ó lote, para un ciclo en un determinado tiempo. En estos equipos -- las condiciones de contenido de humedad y temperatura cambian continuamente en cada punto del secador.

**detalle: SECADOR INTERMITENTE DE LECHO FLUIDIZADO**

Aquí el material a secar, se soporta en charolas con fondo de mallas, abligándose así al aire por medio de mamparas a pasar a través del material.

**detalle: SECADOR DE CHAROLAS Y COMPARTIMIENTO**

El material se encuentra sobre charolas, las cuales van sotenidas a un columpio o sobre carritos para su mas rápida operación.

El aire caliente circula transversal al material en las charolas.

**detalle: SECADORES INDIRECTOS**

El calor para el secado es transferido al material húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado es eliminado independientemente del medio calentante, la velocidad de secado depende del contacto del material húmedo -- en la superficie caliente. Estos secadores indirectos son -- llamados secadores de inducción ó secadores de contacto.

Entre la gama de éstos secadores indirectos tenemos:

**detalle: SECADORES CONTINUOS INDIRECTOS**

El material en forma continua pasa a través del secador y -- mantiene un contacto directo con las superficies calientes.

**detalle: SECADOR DE TAMBOR**

Estos cuentan de uno ó más tambores., el material se alimenta con un reacomodo del material en forma de una capa delgada. El calentamiento puede llevarse a cabo por medio de vapore ó agua caliente.

**detalle: SECADORES DE TRANSPORTE HELICOIDAL (TIPO GUSANO)**

Secador de operación continua, no obstante que éstos secadores son de operación continua, existe la posibilidad de -- emplearlos en vacío. Es posible recuperar eficientemente el solvente como en otros secadores indirectos.

**detalle: SECADORES DE CILINDROS**

Presentando movimientos de rotación, los cilindros son generalmente calentados por vapor y se emplean para el secado de hojas continuas de papel, celofán, piezas textiles, celulosas, etc.

**detalle: SECADORES VIBRATORIOS DE CHAROLAS**

El calentamiento se logra por medio de vapor o agua caliente.

**detalle: SECADORES ROTATORIOS DE TUBOS DE VAPOR**

El medio de calentamiento puede ser vapor o agua de calentamiento. También en éstos es posible emplear presiones relativamente bajas, con objeto de recuperar el solvente si así se desea.

**Detalle: SECADORES INDIRECTOS INTERMITENTES**

Estos secadores están divididos de acuerdo a su diseño mecánico con o sin agitación. Son generalmente adaptables para operarse a vacío.

Entre estos tipos tenemos:

**detalle: SECADORES DE PAILA AGITADA O RECIPIENTES CON ASPAS**

Pueden ser operados a presión atmosférica ó bajo vacío., Son eficientes en el secado de varios sólidos que entre otros -- tenemos por ejemplo: Líquidos, Jarabes, pastas ó sólidos granulares.

**detalle: SECADORES DE CHAROLAS AL VACIO**

Este tipo de secadores no incluye el mecanismo de agitación, su medio de calentamiento es logrado por contacto por vapor de agua y/o agua caliente que circula por las placas o entre paños de calentamiento en los cuales se encuentra el material húmedo.

**detalle: SECADORES ROTATORIOS AL VACIO**

Este secador incluye el mecanismo de agitación, el cual el material húmedo es agitado en un recipiente horizontal estacionario.



Se recomienda que el agitador sea calentado para evitar así el pegado del material a su superficie. Para éste secador - no siempre es necesario el vacío, se recomienda como segunda opción cuando sea necesario avanzar el período de secado.

#### detalle: SECADORES POR CONGELACION

Por congelación del material a muy bajas temperaturas, generalmente a menos 40 °C. El secado se lleva a cabo en vacío y por aplicación de calor regulado a esa presión (Unos cuantos mm. de Hg. abs.) se produce una sublimación de la humedad.

#### detalle: SECADORES INFRARROJOS DE CALOR RADIANTE

Para éste tipo de secado la operación depende de la generación, transmisión y absorción de los rayos infrarrojos.

#### detalle: SECADORES DIELECTRICOS

Operan por medio de un campo eléctrico de muy alta frecuencia, es el único en el cual la generación de calor comienza en el centro del sólido.

Es conveniente aclarar que algunos secadores rotatorios - pueden ser la combinación del tipo Directo e Indirecto, esta clasificación es basada en la transferencia de calor, - algunos la enfocan tomando en consideración las características del manejo del material: continuos o Intermitentes.

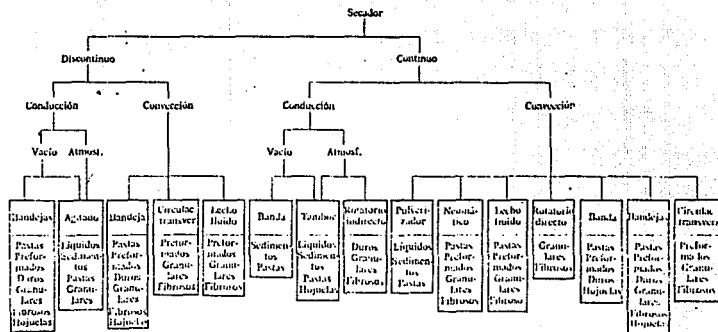


TABLA 3.1.- Clasificación de los secadores en base a su método de operación.

## **CAPITULO IV**

**FACTORES PARA LA CLASIFICACION DE LOS SECADORES**

## FACTORES PARA LA CLASIFICACION DE LOS SECADORES .

Antes de detallar la clasificación de los Secadores, será necesario tener en cuenta la importancia de varios factores. Dependiendo de las condiciones de proceso, los factores considerados son:

- BAJO COSTO INICIAL DE LOS SECADORES INTERMITENTE, ESPECIALMENTE EN INSTALACIONES QUE NO LLEVAN VACIO
- ALTOS COSTOS DE OPERACION DE LOS SECADORES INTERMITENTES, PRINCIPALMENTE LOS DE COMPARTIMIENTO
- LIMITACIONES DE CAPACIDAD DE LOS SECADORES INTERMITENTES, LOS CUALES PRESENTAN BAJAS CAPACIDADES DE CARGA Y DETERMINADAS CONDICIONES DE ALIMENTACION.

Para las condiciones de alimentación existen tres tipos:

- a) Soluciones, suspensiones coloidales y emulsiones., suspensiones capaces de ser bombeadas conteniendo sólidos finamente divididos, pastas y lodos.
- b) Polvos de flujo libre, sólidos granulares cristalinos o fibrosos, capaces de soportar tratamientos mecánicos.
- c) Sólidos incapaces de soportar tratamientos mecánicos, debido a su fragilidad, aspecto y tamaño.

Los ejemplos para los incisos anteriores son los siguientes:

- a') Café instantaneo, suero de leche, pigmentos, arcillas coloidales y sangre.
- b') Harina de soya, carbón de antracita, fibra de asbesto, etc.
- c') Rayón, cerámica., etc.

Método de transferencia de calor., Cuya selección está influenciada por los factores siguientes:

Convección de calor:

- El control de la temperatura del medio de calentamiento es relativamente sencillo.
- La temperatura del producto no puede exceder la temperatura del bulbo húmedo del medio de transferencia.
- Temperaturas bajas (71 °C ó menos) puede ser logradas, porque el secador puede ser operado de tal forma que el producto se encuentra a la temperatura del bulbo húmedo del aire.

Como todo aparato presentan siempre ventajas y desventajas, ahora después de ver las ventajas a continuación detallaremos algunas desventajas:

- La eficiencia térmica es baja, a menos que el calor sea recuperado de los gases de salida ó por una porción recirculada
- La generación de polvos puede ser excesiva y en ciertos casos se presenta la necesidad de sistemas caros y complejos de recuperación del material, siendo tipo húmedo o seco
- El método es económicamente elevado para las aplicaciones donde deberá recuperarse él ó los solventes

La Conducción de Calor tiene la ventaja de una alta eficiencia térmica, mínima generación de polvos, economía de operación en la recuperación., pero requiere atención de la temperatura del medio de calentamiento y del tiempo de retención cuando los materiales son sensibles al calor., cuando el secador es diseñado para que opere a vacío, los factores mencionados son de menor importancia. Veamos que la radiación no la podemos considerar como un método en sí, sino como una forma de aprovechar las superficies calientes del equipo usado .

### Tiempo de Residencia.

Para operaciones continuas de secado, donde la sensibilidad al calor es un problema y el tiempo de retención es importante, algunos secadores continuos pueden ser usados en el tratamiento de materiales sensibles, bajo presión atmosférica ó al vacío, según sea el caso.

Los equipos intermitentes todos son estacionarios y la mayoría de ellos emplean ventiladores para hacer circular aire sobre ó a través del material húmedo.

Un secador con una cámara sencilla es a menudo llamado un secador de compartimiento, si la carga es soportada en anaqueles, será un secador de anaqueles y si es puesta en charolas, será un secador de charolas. El secado en charolas puede llevarse a cabo en dos tipos de flujo de aire:

- FLUJO TRANSVERSAL AL MATERIAL
- FLUJO A TRAVÉS DEL MATERIAL., En éste caso al aire es forzado a pasar a través del lecho del sólido.

La Estructura del lecho puede estar construida por partículas en su estado natural como son los granos, etc., ó partículas que hayan sido antecidas por un proceso de preformación previa que pueda llevarse a cabo por extrusión, granulación ó aglomeración., también el lecho puede estar formado por partículas de naturaleza fibrosa como el rayón. lana etc. La compactación del material a desecar es variable desde un sólido que presente una forma totalmente rígida aunque porosa y permeable, hasta partículas que puedan ser suspendidas en una corriente de aire de alta velocidad.

Por medio de la experimentación podemos dar una evolución cuantitativa y real de la forma, compactación de las partículas con respecto a su importancia crítica en la velocidad de transferencia de calor y masa .

Se estima que una de las dificultades en el uso de secadores de charolas es la mala distribución de la temperatura, cuando

de flujo transversal se trate, debido a su colocación en la cámara. La solución posible a este problema se presenta por medio de un cambio de posición de las charolas o del lecho, o bien por medio de la utilización de mamparas que tengan como objetivo producir turbulencias a la entrada de la cámara de secado., de esta forma será evitado un calentamiento en partes de la charola con un consiguiente secado uniforme.

Para el caso de calentamiento por convección la regulación de la temperatura se lleva a cabo por medición y regulación de las condiciones del aire de secado. La temperatura del material sometido al proceso no puede exceder en ningún momento a la temperatura del aire circundante, si se desea una temperatura baja, el secado por convección es uno de los indicados, aún cuando tiene dos ventajas como son:

**- INEFICIENCIA TERMICA Y ARRASTRE DEL MATERIAL HUMEDO POR LOS GASES DE CALENTAMIENTO.**

Estos pueden ser eliminados aunque existan casos en que los aditamentos de mejora al equipo aumenten el costo de tal forma que sea más económico el uso de la transferencia de calor por otro medio.

El Secador deberá estar perfectamente aislado, no sólo para las altas economías térmicas, sino para evitar en lo posible la condensación en las paredes interiores, las cuales deberán estar a temperaturas arriba del punto de rocío.

Los secadores del tipo gabinete van desde la unidad de laboratorio hasta la comercial (ver capítulos anteriores) y es según la unidad industrial prevaleciente la que de la pauta según sus necesidades. Estas estimaciones y técnicas traen consigo varios años de experiencia de acuerdo a inventivas y necesidades creadas propiamente por la industria.

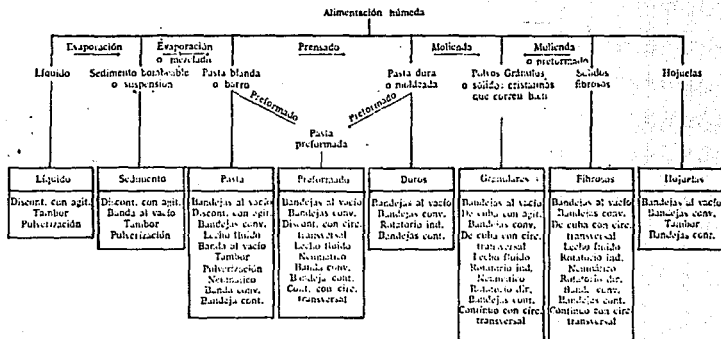
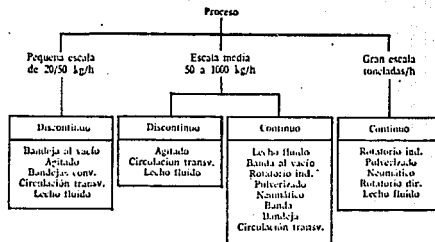


TABLA 4.1.- Clasificación de los secadores en base a la forma física de alimentación.





**TABLA 4.2.- Clasificación de los secadores por su escala de producción .**

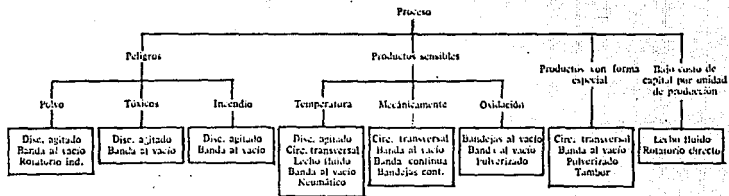


TABLA 4.3.- Clasificación de los secadores según su conveniencia para casos especiales.

## **CAPITULO V**

### **FENOMENOS OBSERVADOS EN EL SECADO DE SOLIDOS (Variables externas e internas)**

## FENOMENOS OBSERVADOS EN EL SECADO DE SÓLIDOS.

### Variables externas e internas.

Como ampliamente es conocido la operación de secado consiste en la evaporación de un líquido presente normalmente en el material a secar siendo orgánico e inorgánico, convirtiendo éstos a sólidos secos por medios térmicos. Al principio de los capítulos resaltamos que no se consideraba como secado - la extracción de agua por medios mecánicos como eran: Prensa do, centrifugado., etc. ya que estos medios están incluidos en la rama de separaciones mecánicas, generalmente anteceden al secado y su uso se debe principalmente al factor económico ó a la naturaleza del material húmedo.

Estos compuestos inorgánicos se secar (nuestro tema) características valorables a juicio de uno son dependientes modificando el proceso de secado., aunque siempre será la extracción de agua u otro líquido por medios térmicos.

El estudio del secado, debe de tomar en cuenta problemas de mecánica de fluidos, transferencia de calor y masa (difusión en sólidos) química de superficies y estructura de sólidos. En vista de esta complejidad, los procesos interactuantes pueden ser radicalmente diferentes para sólidos diferentes, no existe una teoría universal que pueda ser aplicada en forma general al diseño y operación de equipo de secado. Sin embargo, hay características generales del compartimiento de secado de sólidos granulares (partículas no porosas) - que son encontradas en un gran número de casos, este equipo ha sido diseñado para demostrar esto. En partículas. la construcción de la curva de secado, esto es el contenido de humedad como función del tiempo de secado, se lleva a cabo en nuestro aparato apuntado en el tema, y a partir de ésta, se podrán hacer varias deducciones que podrían tener relevancia - en el diseño industrial de unidades de secado.

### COMPORTAMIENTO GENERAL DE SECADO (MATERIAL INORGANICO)

Al secar un sólido húmedo con un gas de temperatura y humedad constante, siempre aparece e un patrón de comportamiento general, inmediatamente después del contacto entre la muestra y el medio secante la temperatura del sólido se ajusta hasta que alcanza un estado estable. La temperatura del sólido y la velocidad de secado pueden incrementarse o disminuir para alcanzar la condición de estado estable. En el estado estable una prueba de temperatura mostraría que la temperatura de la superficie del sólido del medio secante, la temperatura dentro del sólido a secar, tienden a la temperatura del bulbo húmedo del gas., pero la concordancia podría ser imperfecta debido al "atraso" del movimiento de masa y calor. Una vez que las temperaturas de la superficie e interior del sólido han alcanzado la temperatura del bulbo húmedo del gas, éstas se estabilizan y por lo tanto la velocidad de secado también permanece constante, y este será el llamado período de secado de velocidad constante.

El período de velocidad termina cuando el sólido alcanza el contenido de humedad crítico, después de éste punto la temperatura de la superficie se eleva y la velocidad de secado decrece rápidamente. El período de velocidad decreciente puede tomar mucho más tiempo que el período de velocidad constante, aún cuando la eliminación de la humedad puede ser mucho menor. La velocidad de secado llega a cero en el contenido de humedad de equilibrio, que es el contenido de humedad más bajo obtenible con éste sólido bajo las condiciones de secado usadas.

Las Fig. 5.1 y 5.2 muestran curvas típicas de secado, una en base al contenido de humedad en función del tiempo y la otra en base a la velocidad de secado en función del contenido de la humedad. La gráfica de contenido de humedad contra tiempo (fig. 5.1), es la forma en que se obtienen los datos de la prueba de secado. La fig. 5.2, gráfica de velocidad de secado en

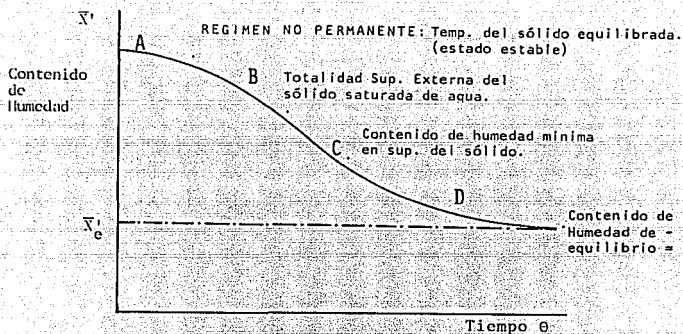


Fig. 5.1 Curva típica de secado.

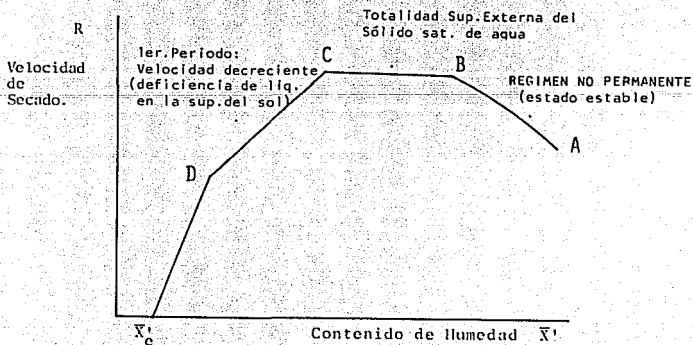


Fig. 5.2 Curva típica de Secado.

controlan la difusión en el movimiento del líquido, y por tanto presentan períodos de velocidad constante muy largos.

En el punto C, el contenido de humedad del sólido es apenas suficiente para alimentar toda la superficie.

Durante el período de secado entre los puntos C y D de la fig. 5.2, llamado el primer período de velocidad decreciente, la superficie llega a estar más y más deficiente en líquido, debido a que la velocidad del movimiento del líquido a la superficie es más lenta que la velocidad de transferencia de masa desde la superficie; en el punto D no hay una área significativa de superficie saturada del líquido.

La parte de la superficie que está saturada se seca por transferencia convectiva de masa y calor con la corriente de gas secante. El vapor de los niveles más bajos de la muestra se difunde a la parte de la superficie que no está saturada, y continúa su difusión en la corriente gaseosa. Este mecanismo es muy lento comparado con la transferencia convectiva de la superficie saturada.

A contenidos de humedad más bajos que el del punto D, fig. 5.2 toda la evaporación ocurre desde el interior del sólido. Mientras el contenido de humedad continúa cayendo, los gradientes para la difusión de masa y calor también decrecen, hasta que  $X_e$ , el contenido de humedad de equilibrio es alcanzado, después del cual, no hay más secado. Este contenido de humedad de equilibrio es alcanzado cuando la presión de vapor en el sólido es igual a la presión parcial del agua en el gas secante de entrada. Este período es llamado "EL SEGUNDO PERÍODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE".

Generalmente uno de los mecanismos es el que domina en la operación de secado, pero no es raro encontrar diferentes mecanismos a diferentes tiempos. El mecanismo particular que domina durante el secado de un sólido puede ser determinado por un estudio de los gradientes de humedad interna.

contra contenido de humedad, es mucho más descriptiva del proceso de secado. Sin embargo, se obtiene por la diferenciación de los en la forma de la fig. 5.1 y por tanto esta sujeta a considerable dispersión de datos y su correspondiente incertidumbre.

Estas curvas típicas de secado, están relacionadas al mecanismo por medio de la cual ocurre el secado. El período de secado representado por el segmento A-B de las curvas de la fig. 5.1 y de la fig. 5.2, es el período de régimen no permanente durante el cual la temperatura del sólido alcanza su valor de equilibrio (estado estable). Aunque la forma mostrada es típica, casi cualquier forma es posible y A-B puede ocurrir a velocidad decreciente ó a valor creciente como la mostrada. Durante el período de velocidad constante (segmento B-C de las curvas fig. 5.1 y 5.2) la totalidad de la superficie externa esta saturada con agua.

El secado procede como el de un depósito de líquido sin influencia directa del sólido en la velocidad de secado. Es posible que la rugosidad de la superficie del sólido sobre la cual la película de líquido se extienda y pueda incrementar los coeficientes de transferencia de masa y calor, pero este efecto no se ha establecido firmemente.

La temperatura de la superficie alcanza la temperatura de bulbo húmedo, como podría esperarse., el régimen de velocidad de secado constante continúa mientras la masa de la superficie se transfiere continuamente reemplazada por el movimiento de líquido procedente del interior del sólido. El mecanismo del movimiento del líquido y consecuentemente la velocidad de éste, varría con la estructura del sólido. En sólidos que tienen espacios abiertos relativamente grandes, el movimiento es controlado probablemente por la tensión superficial y las fuerzas de gravedad dentro del sólido. Como la difusión es mucho más lenta que el movimiento por gravedad y capilaridad, los sólidos -



La determinación de gradientes experimentales confiables, es sumamente difícil. La técnica usual incluye cortes en segmentos de muestras especiales preparadas para ser secadas a diferentes tiempos, a una determinada temperatura, etc., y de esta forma determinar el contenido de humedad de cada segmento. Las objeciones que se han presentado a esta técnica son el gradiente de humedad que pueda ser desbaratado durante el corte y la pérdida de humedad que pueda ocurrir en los bordes de la muestra, siendo recomendable utilizar solo muestras rígidas o semi-rígidas.

#### FLUJO CAPILAR

En secado el flujo de líquido resultante de capilaridad, se aplica a líquidos que no están en solución y a toda la humedad arriba del punto de saturación de los tejidos y fibras - en materiales como son los textiles, cueros, papel, etc., y a toda la humedad arriba de la humedad de equilibrio (en saturación atmosférica) en polvos finos y sólidos granulares - como son los pigmentos de pinturas, minerales, barro, tierra y arena.

#### DIFUSION MOLECULAR

En sólidos relativamente homogéneos, tales como los productos orgánicos, fibrosos, coloides, las tortas porosas., la humedad se mueve hacia la superficie en función de una difusión molecular. La humedad puede ser movida por difusión de vapor a través del sólido, manteniendo un gradiente de temperaturas por calentamiento creándose de esta forma un gradiente de presión de vapor. La vaporización y la difusión pueden ocurrir en cualquier sólido donde el calentamiento sea en una superficie y el secado por otra, y donde el líquido se aisle entre las partículas del sólido. El movimiento de líquido por difusión en sólidos está restringido a un contenido de humedad en equilibrio abajo del punto de saturación atmosférica, y a sistemas en los cuales la humedad y el sólido son mutuamente solubles.

La primera clase se aplica al último paso en el secado de arcillas, almidones, harina, textiles, papel y madera., la segunda clase incluye el secado de jabón, gelatinas, coollas, etc.

#### VARIABLES EXTERNAS.

El método más comunmente usado para investigar las características de secado de sólidos, es un estudio basado en los efectos de las variables externas o de operación de secado. Esto se debe a que los resultados así obtenidos son de aplicación directa al diseño y operación de secadores. Las principales variables externas incluidas en cualquier estudio de secado son: temperatura, flujo de aire, humedad del aire, humedad inicial del sólido, estado de subdivisión del sólido, agitación del sólido, método de soporte del sólido y contacto entre las superficies calientes y el sólido húmedo.

Todas estas variables no necesariamente se tienen en un problema de secado., como explicamos la transferencia de calor puede llevarse a cabo por: CONDUCCION, CONVECCION Y RADIACION., entonces tenemos:

#### CONDUCCION.-

La transferencia de energía se lleva a cabo por un movimiento fortuito intermolecular del material. La conductividad térmica es una propiedad del material, es baja tanto en gases como en vapores. La conducción se define sea para los sólidos, líquidos ó gases por la siguiente ecuación:

$$q = dQ_h / d\theta = - K A dt / dl \quad \dots 5.1$$

El signo negativo en la ecuación indica que el flujo de calor va en sentido de una disminución de la temperatura.

### CONVECCION.-

Se aplica a la transferencia de calor de un lugar a otro por un movimiento real de la substancia caliente, la convección puede ser natural ó forzada. Para muchos propósitos, la transferencia de calor por convección puede expresarse por:

$$q = h A (t - t_s) \dots 5.2$$

### RADIACION.-

La transferencia de calor por radiación térmica es ordinariamente una fracción menor de la energía total suministrada al proceso de secado, aunque en determinadas condiciones es la principal fuente de energía calorífica.

De acuerdo con la ley de STEFAN-BOLTZMAN, la transferencia de energía por radiación entre dos cuerpos, es proporcional a la diferencia de sus temperaturas a la cuarta potencia:

$$\text{LEY DE STEFAN BOLTZMAN} \quad q_r = C A (T_1^4 - T_2^4) \dots 5.3$$

donde:

$$C = \text{cte igual a } 0.173 \times 10^8, \text{ BTU/hr. ft}^2 \text{ } ^\circ\text{R}^4.$$

Considerando el coeficiente de transferencia por radiación  $t_r$  tenemos:

$$q_r = e h_r (t_1 - t_2) \dots 5.4$$

Si la emisividad  $e$ , se toma como 1:

$$h_r = \frac{0.173 (T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4}{t_1 - t_2} \dots 5.5$$

Consideremos siempre que la emisividad se encuentra entre el rango 0 a 1.

**TRANSFERENCIA DE MASA.-****Condiciones internas y externas:**

El estudio del secado de un sólido se puede basar en el mecanismo interno de flujo de líquidos ó en el efecto de las condiciones externas como la temperatura, humedad, flujo de aire, estados de subdivisión y más sobre la velocidad de secado. El primer procedimiento generalmente requiere un estudio de las condiciones internas y como segundo procedimiento, aunque generalmente es de menor importancia, sin embargo se usa más, - pues los resultados tienen una aplicación grande inmediata en el diseño y evaluación del equipo.

**MECANISMO INTERNO DE FLUJO DE LIQUIDO.-**

Puede ocurrir de varias formas, según sea la estructura del sólido., veamos algunos de los posibles mecanismos:

- DIFUSION EN SOLIDOS CONTINUOS HOMOGENEOS
- FLUJO CAPILAR EN SOLIDOS POROSOS Y GRANULARES
- FLUJO CAUSADO POR ENCOJIMIENTO O CONTRACCION Y GRADIENTES DE PRESION
- FLUJO CAUSADO POR GRAVEDAD
- FLUJO CAUSADO POR UNA SECUENCIA DE VAPORIZACION/CONDENSACION.

## CAPITULO V I

EQUIPOS UTILIZADOS EN LA OPERACION DE SECADO

## EQUIPOS UTILIZADOS EN LA OPERACION DE SECADO.

### SECADORES DE COMPARTIMIENTO.

Cuando la consistencia de la materia prima ó del producto seco es tal que puede manejarse en charolas se utiliza un tipo cualquiera de compartimiento. Aquí se incluyen substancias húmedas o mojadas así como también plásticas y masas granulares tales como materiales cristalinos, pastas y precipitados. Madejas y otros productos textiles, así como algunos productos similares -- que no han de manejarse en charolas, se secan también en este tipo de secadores. Cuando el material está sobre las charolas es fácil manejar tanto en la carga como en la descarga sin pérdidas y por tanto se manejan por éste método productos valiosos en pequeñas cantidades.

El aparato consta esencialmente de una cámara de secado rectangular que tienen las paredes recubiertas de material aislante para el calor (Fig. VI-1) en el interior de la cámara hay estanterías hechas de ángulo sobre las cuales charolas pueden deslizarse o -- también vagonetas, de forma de una vagoneta cargada con charolas puede recorrer el secadero con puertas cerradas. Existe un dispositivo para la circulación del aire sobre las charolas. Los secadores de éste tipo están provistos de dispositivos para calentar el aire en el interior del secador en lugar de hacerlo fuera de él.

### SECADORES DE COMPARTIMIENTO AL VACIO.

En muchos casos puede ser conveniente el secar materiales sobre charolas más rápidamente de lo que podría hacerse al pasar una corriente de aire sobre ellas y además haciendo que la temperatura sea más baja que la correspondiente a la evaporación del agua a la presión atmosférica. En estos casos se utiliza un secador al vacío. En la fig. VI- II, se representa un secador de éste tipo.

### SECADORES ROTATIVOS.

El material que se maneje en un secador rotativo debe ser granular o cristalino, debe manejarse en masa, debe secarse bastante al principio de la operación para ser manejado por los métodos ordinarios de transporte y no deben ser muy pegajosos para que no se adhi

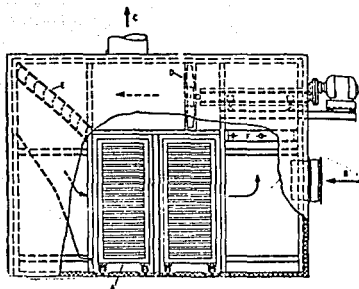


FIG. VI-1 .- SECADOR DE COMPARTIMIENTO Y CHAROLAS., A, vagoneta que transporta las bandejas; B, entrada de aire; D, ventilador; E, pantallas deflectoras de aire; F, - calentador de tubos de aleta .

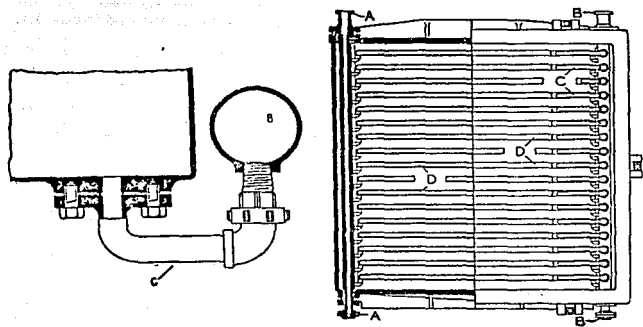


FIG. 11 .- SECADOR DE VACIO. , A, tubería de entrada del vapor de agua; B, tubería de salida del condensado; C, - conexiones de las estanterías con las tuberías; D, estanterías .



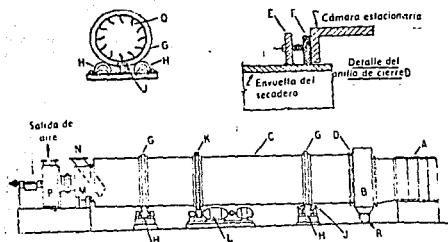


FIG. VI-111 .- SECADOR ROTATIVO., A, calentador de aire; B, cámara estacionaria; C, envuelta del secador; D, anillo de cierre; E, soporte de cierre; F, anillo de guarnición de cierre; G, anillos forjados; H, rodillos soportes; J, rodillos de empuje; K, engranaje de movimiento; L, motor y reductor de velocidad; M, cámara de descarga de aire; N, tolva de alimentación; P, ventilador de descarga; Q, aletas.

era a las paredes del secador.

Los secadores rotativos consisten todos ellos en una envuelta cilíndrica colocada con su eje formando un cierto ángulo con la horizontal y montado sobre rodillos de forma que pueda girar. El material que ha de secarse se introduce por el extremo más elevado del secador y por la rotación de éste, corrientemente ayudado por paletas, avanza gradualmente hacia el extremo inferior por el que se descarga la fuente de calor. En un secador rotativo es generalmente el aire que circula a lo largo del secador. Estos Secadores se denominan secadores de calentamiento directo. El calor también puede comunicarse por el exterior de la envuelta del secador, en cualquiera de los dos casos el calor puede generarse por combustión de un combustible o puede obtenerse por vapor de agua, si el agua se calienta, el vapor se sopla sobre una serie de tubos de aletas calentados por éste. Si se ha de calentar por combustión de un combustible puede hacerse en una cámara cerrada o en un paquete de tubos aletados, con los productos de la combustión por su exterior, o por los productos de combustión que se introduce directamente en la corriente de aire (ver fig. VI-III). Los secadores de calentamiento directo (son aquellos en que el calentamiento se aplica por el exterior de la envuelta) se calienta siempre a fuego directo, pero esta variante del secado rotativo no es corriente .

#### SECADOR ROTO-LOUVRE.

Este secador es una modificación del secador rotativo en el que el aire se inyecta a través del lecho que forma el material que se ha de secar. El secador fig. VI-IV , es una copia del secador de marillos en su interior. El flujo de materia y aire en este secador va, en todos los diseños, en corrientes paralelas. Con respecto al contacto real entre el aire y el material, el flujo no va ni en corrientes paralelas ni en contracorrientes, sino más bien en corrientes cruzadas.

Las ventajas que suele indicar para este secador son que puesto -- que el material no se eleva ni cae en su trayecto por la envuelta sino que únicamente lo que hace es rodar sobre el fondo, hay menor

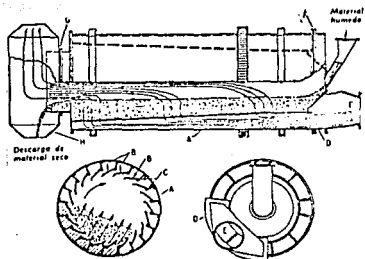


FIG. VI-IV .- SECADOR ROTO-LOUVRE ., A, Envuelta cilíndrica; B, caletas; C, costillas; D, cámara de distribución del aire caliente; E, entrada de aire caliente; F,G cierres rotativos; H, descarga del producto.

tendencia a que se disgrege los materiales frágiles. También se dice que debido a que el aire caliente pasa realmente a través del lecho del material, el aire llega más próximo al equilibrio con el material, la velocidad del secado es más rápida y por lo tanto el secador puede ser más corto que con los secadores rotativos corrientes.

#### TURBO SECADORES. (FIG. VI-V)

Este secador consiste en una envuelta vertical cilíndrica ó poligonal A. En el fondo de ella hay una base plana B movida por el engranaje C. De ésta base plana se elevan unas barras verticales D, unidas en la parte superior por unas patas de araña -- con conexiones aún cojinete de guía. Alrededor de éstas barras van unos anillos de hoja metálica E, en las que están unidas -- unas charolas en forma de cuña F. El conjunto de subtotalidad gira como una unidad. La alimentación entra por G, llenas las charolas y a medida que giran van pasando por debajo de un nivelador fijo K. Después de una revolución pasan por debajo de un rascador J que rasca la carga que hay en la charola y la envía -- sobre la charola inferior por las aberturas K. Existe un nivelador y un rascador por cada fila de charolas. El material seco -- se envía finalmente sobre una tolva L y se descarga por un -- transportador sinfín M.

El aire se introduce por diversas aberturas que hay en el fondo de la envuelta. En el centro del secador va un eje vertical N -- que lleva montados varios ventiladores del tipo mostrado en la correspondiente figura. Estos ventiladores decargan radialmente sobre las charolas opuestas a ellos y el aire retorna al eje -- central por los espacios que hay entre los ventiladores, como se indica en la figura por las flechas. Los paquetes de tubos con aletas P sirven para recalentar el aire continuamente a medida que circula.

La cantidad de aire que descarga por Q es tal que la humedad en el secador permanece entre los límites deseados.

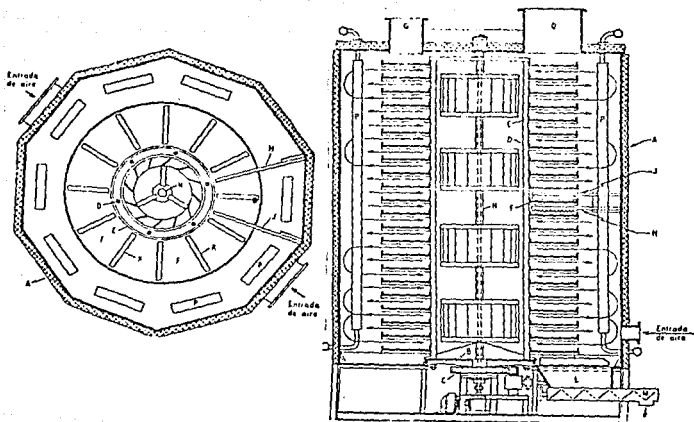


FIG. VI-V .- TURBOSECADORES ., A, envuelta; B, base; C, engranajes de movimiento; D, barras; E, charolas metálicas; F, charolas; G, abertura para alimentación; H, rascador - nivelador; J, rascador; K, abertura para el paso del material de una a otra charola; L, caída del producto seco; M, transportadores de tubo de aleta; Q, - descarga de aire .

## COMBINACIONES DEL FILTRO SECADOR (FILTROS ALIMENTADOS POR LA PARTE SUPERIOR).

En muchos casos en que se elimina un sólido en suspensión en un líquido por medio de una filtración, se emplea un tipo de filtro conocido como filtro continuo rotativo. Este equipo puede disponerse de forma que después de que el material se ha secado se hace ligar a una corriente de aire caliente sobre el filtrado por lo que la filtración y el secado se efectúa sobre una sola pieza del equipo. Lógicamente, desde cierto punto de vista éstos podrían clasificarse como secadores, pero es más conveniente posponer ésta a la filtración.

### CILINDROS SECADORES.

Estos secadores se utilizan para el secado de hojas de papel continuas o de tejidos. Consisten en un considerable número de cilindros calentados por vapor, sobre los que las hojas pasan continuamente. La fig. VI-VI ., representa una sección de un secador de este tipo.

En ella los cilindros A están en dos filas colocados a distintos niveles, y la hoja está indicada por la letra B. Los cojinetes que lleva el cilindro se representan diagramáticamente en C.

La fig. VI-VI (parte inferior) representa dos cilindros y su conexión. Corrientemente éstos cilindros se fabrican de fundición, aunque actualmente algunos se fabrican de chapa de acero soldado. Uno de los muñones es hueco y sirve para la introducción del vapor de agua y también lleva una tubería por esta abertura para eliminar el condensado.

En el exterior del muñon hay un sólo accesorio que está provisto de una junta con objeto de que el accesorio permanezca estacionario, pero unido a la tubería rotativa. Una junta de este tipo representada en la figura: VI-VII . La tubería A está unida al muñon del cilindro y gira con él. El cuerpo de la junta B es estacionario . Sobre la tubería va un saliente C esférico y pulimentado. La parte pulimentada se apoya un anillo de grafito D con una cara esférica del mismo radio que el saliente C. Un buje de grafito E soporta el cuerpo de la junta sobre la tubería giratoria. Un muelle F mantiene un cierto cierre hermético entre las -

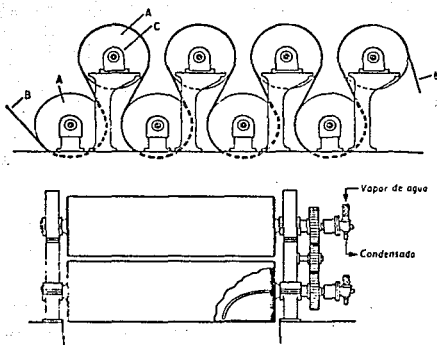


FIG. VI-VI .- SECADOR DE CILINDROS., A, cilindros;  
B, lámina continua; C, cojinetes.

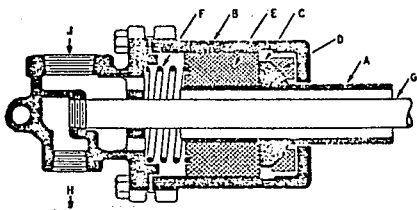


FIG. VI-VII .- JUNTA ROTATIVA., A, tubería rotativa del vapor; B, cuerpo de junta estacionaria; C, saliente; D, cierre de grafito; E, buje de grafito; F, --muelle de mantenimiento; G, descarga de condensado; H, conexión de descarga del condensado; J, conexión para el vapor .



dos superficies esféricas. El condensado sale por H. El vapor se introduce por J y entra en el cilindro por el espacio que queda entre la tubería A y G.

#### SECADOR DE FESTON.

Este tipo de secadores es muy utilizado para tejidos y algunas clases de papel, especialmente en el papel cuché, utilizado para imprimir fotografías (fotograbados). En la figura: VI-VIII, -- la hoja húmeda se alimenta por A, pasa sobre una serie de cilindros y cae hacia abajo para formar una serie de rizos B. Un transportador continuo de cadena, transporta una serie de barras cruzadas C, regulado con respecto a la velocidad de la hoja de tal manera que el rizo caiga en un momento determinado para que el próximo cilindro tome la hoja formando un nuevo rizo. Para estar seguro que el rizo está formado adecuadamente, el ventilador D sopla aire a través de un orificio E y abre el rizo. Cuando el material está completamente seco, sale a través de una serie de rodillos F y finalmente se enrolla sobre el tambor G. El agrupamiento de los pequeños rodillos en la entrada y salida del secador es para controlar la velocidad de la hoja y dar tensión en el enrollado final. La circulación del aire está indicada en la sección recta. Una serie de motores mueve una serie de ventiladores H y el aire fresco se toma de los alrededores de las cassetas de motores. Este aire es dirigido por varias aletas y pantallas J para asegurar que la distribución descendente del aire en la parte derecha del secador es tan uniforme como sea posible. Después de pasar hacia abajo por los rizos, el aire pasa a través de un calentador K formado por un paquete de tubos con aletas calentados por vapor. El aire húmedo se descarga por L y la cantidad de aire descargado se controla por la válvula de mariposa M, cuya posición se ajusta por medio de instrumentos automáticos de control.

#### SECADOR AGITADO MECANICAMENTE.

Muchos materiales que son muy pegajosos para ser manejados en secadores continuos rotativos, pero que no son tan valiosos como para emplear secadores de chaolas o compartimientos, se trata de secadores de agitación mecánica, de lo que existen muchas variaciones.

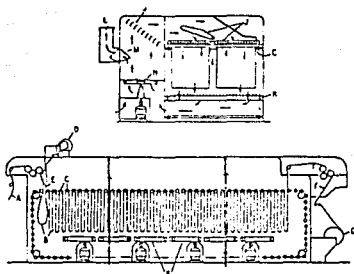


FIG. VI-VIII .- SECADOR DE FESTON ., A, entrada de la lámina; B, festones o rizados; C, barras transversales; D, so-  
plador; para formar los rizados; E, tobera de aire;  
F, salida de la lámina; G, producto enrollado; -  
H, ventiladores; J, pantallas; K, calentadores;  
L, descarga de aire; M, válvula de mariposa para  
el control de aire .

Este tipo se representa en la fig. VI-IX, el cual consiste en un cilindro horizontal provisto de una camisa para calentamiento A está formado para cerrarse por unas cabezas adecuadas B. Lleva éste cilindro las puertas cerradas C en la parte superior y la descarga D en el fondo. En el interior lleva un eje central E, que pasa a través de las cajas de estopa F, de la envuelta y -- que va soportado por cojinetes G. En este eje va montado un agitador con paletas helicoidales H, de forma que cuando un juego de paletas mueve el material en na dirección, el otro juego de paletas lo mueve en forma contraria.

#### SECADORES POR ATOMIZACION.

En el mecanismo de atomización del secador de espreas la pulverización es lograda mediante aire que golpea la corriente de líquido. El líquido sale de la tobera en forma de filamentos que se convierten en gotas mediante el choque con la corriente del aire, el tamaño promedio de las gotas disminuye a medida que la presión de la esprea aumenta.

En un secador por atomización una solución sea líquida ó una -- suspensión se dispersa en una corriente de gas caliente, en la forma de un rocío de gotas muy finas, en esa corriente se evaporiza rapidamente la humedad de las gotas, dejando partículas residuales de sólido seco que se separan de la corriente gaseosa. El flujo de gas y líquido pueden ser a contracorriente, corriente paralela o una combinación de ambas dentro del mismo aparato.

Las gotas se forman dentro de una camara de secado cilíndrica, sea por medio de un disco que gira a gran velocidad y que pulveriza por presión o por el sistema común de esreado.

En cualquier caso es bueno prevenir el que las gotas de partícu las húmedas choquen contra la superficie sólida antes de que se haya producido el secado. De esta manera se dirá que las camaras de secado son necesariamente grandes. Los diámetros de 2 a 10 m. son los más comueas. En la esprea se produce un movi-- miento tangencial de alta velocidad enel líquido que se va a pulverizar. La fuerza centrífuga resultante hace que el líquido haga remolinos alrededor de la circunferencia del orificio de la tobera, el líquido gira entonces hacia afuera formando un cono hueco,

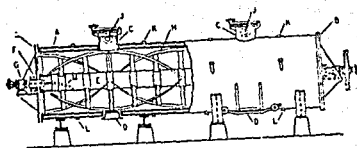


FIG. VI-IX .- SECADOR DISCONTINUO CON AGITACION., A, envuelta con camisas; B, cabezas; C, conexiones de carga; D, puertas de descarga; E, eje del agitador; F, caja de estopas; G, cojinetes del eje; H, paletas del agitador; J, salidas del vapor de agua; K, entrada del vapor de agua; L, salidas de condensado; M, sifón de descarga para el condensado del eje.

el cual se rompe finalmente dando origen a gran número de pequeñas gotas. Como cualquier tipo de secador presenta ventajas estas son:

- TIEMPO CORTO DE SECADO DEL ORDEN DE 2 a 20 SEG.
- PERMITE SECAR MATERIALES ALTAMENTE SENSITIVOS AL CALOR. (PRODUCTOS TALES COMO ALIMENTOS O DETERGENTES, ADQUIRIENDO LA CONSISTENCIA DESEADA, DENSIDAD APARENTE Y PROPORCIÓN DE FLUJO)

Estos puntos son difíciles de obtenerlos en otros tipos de secadores.

Estos secadores tienen además la ventaja que a parte de una solución, jarabe ó pasta, se obtiene un producto seco (completamente) que está listo para el empaque. El comportamiento de un secador por atomización depende del tiempo que las gotas pasan en la cámara de secado y éste depende a su vez del tamaño y tipo de la cámara, del tamaño y velocidad final de las gotas del flujo del aire.

#### SECADORES DE TAMBOR.

Cuando en una fase de un proceso se obtiene una solución de la que se ha de obtener el producto cristalizado, con frecuencia el paso siguiente es la evaporación y la cristalización del material, bien en el mismo evaporador o en otra operación subsiguiente. Por otra parte, muchos materiales, especialmente los coloides, no pueden cristalizarse a partir de sus soluciones y el evaporador elimina agua mientras el producto permanece fluido.

A medida que la solución se hace más concentrada y más viscosa el rendimiento del evaporador se hace menos satisfactorio, hasta que finalmente se alcanza un punto en que la operación resulta imposible comercialmente, y el aparato que elimina el resto del agua se conoce con el nombre de secador. La eliminación final de la humedad que contiene las soluciones concentradas se efectúa normalmente en secadores de tambor de una u otra forma. La característica de este grupo es que se aplica a una película delgada de la solución viscosa sobre la superficie exterior de un tambor que gira lentamente y que interiormente se calienta por vapor de agua.

La velocidad y temperatura del tambor se regula para que el tiempo

ue tarda el material en efectuar menos de una revolución sea suficiente para que este seco y pueda arrojarse de la superficie por un cuchillo adecuado. En esta rama tenemos los secadores de tambor a la presión atmosférica y de vacío. El pulverizado es el tipo último que entraría en nuestro capítulo y si fuera necesario ampliar lo presente se recomienda la bibliografía (1).

#### SECADOR ROTATORIO .

Para el secado de materiales granulares o polvos, este tipo de secadores son los indicados y los más usados, sus ventajas son mayores si se comparan con otro tipo de secadores en lo referente al costo de operación, versatilidad y facilidad de manejo.

El secador rotatorio esta compuesto por un tambor que gira sobre su eje central por el que va circulando el material a secar. Por el interior se introduce una corriente de aire caliente que será en forma simultanea el medio de transmisión de calor y el vehículo para el transporte de humedad. Existen tipos de secadores en los cuales el calentamiento con el flujo del material que se quiere secar. El material sólido se transporta de un extremo a otro del tambor mediante un pequeño desnivel del cilindro que desplaza al producto por deslizamiento sobre la superficie inferior del tambor.

Los secadores estan provistos de aletas interiores que levantan el material y lo dejan caer por gravedad al girar el tambor. -- Parte del polvo del material (povos finos), son arrastrados por la corriente de aire de la que se eliminan mediante un separador ciclónico que se haya a la salida del aire.

## CAPITULO VII

### DESCRIPCION DEL APARATO .

## DESCRIPCION DEL APARATO

Varios procesos de fabricación involucran la operación de secado de materiales granulados. El equipo usado en estas operaciones industriales depende del proceso particular y del tipo de material a secar, por ejemplo., los requerimientos para el procesamiento de alimentos son mucho más estrictos que los materiales usados en la agricultura, así el diseño de secadores para éstos propósitos como ya mencionamos en temas anteriores se determina por la relativa importancia de la sensibilidad al calor, su porosidad, densidad aparente del sólido a secar etc.

Aunque por lo anterior existen diferentes diseños con características definidas para secadores industriales, esto ha tomado forma para poder demostrar por medio experimental algunos de los principios básicos de la operación de secado a los estudiosos de la Ingeniería Química. El aparato descrito en esta tesis, fundamenta los temas anteriormente tratados dando así al estudioso la oportunidad para la medición de la rapidez de secado de cualquier material seleccionado referenciandola como una función de las condiciones típicas de transferencia de calor y flujo de fluidos .

El Secador de Charolas es de tipo experimental, usa aire caliente como medio de secado. Este tipo de secador intermitente de charolas presenta límites para su capacidad de trabajo por ejemplo., las presiones de alimentación no mayores a 3 bares, mantenerlo con una capacidad de material no mayor de 2 Kg., ya que de no hacerlo así la capacidad y tiempo de secado serían extremadamente incongruentes y el secado se lograría equivocadamente .

El equipo de secado consta de una cámara de secado unida



a una balanza granataria., ésta esta conectada directamente con las charolas donde nos dara el cambio de peso de acuerdo a un intervalo de tiempo dado.

En la parte anterior de la camara de secado se encuentra un banco de tubos calentados por vapor, en una area de transferencia de calor en la corriente de aire de  $194 \text{ cm}^2$ .

El aire lo suministra un ventilador axial de tiro forzado que se encuentra en el mismo equipo (VER FIG.X-1)., éste equipo en los extremos de la camara de secado presenta dos ductos de forma cilíndrica transportadora del aire, aquí se hace pasar aire por medio del ventilador axial, donde -- llega al banco de tubos calentados por vapor y sale a la camara de secado pasando directamente al extremo siguiente de el equipo y después a la atmósfera.

El equipo de secado nos da la facilidad de observar y realizar cálculos de: flujo de fluidos, transferencia de calor y masa. Los datos para su cálculo son obtenidos y finados al mismo tiempo.

En general, las operaciones que son necesarias efectuar para cada practica son las siguientes:

- 1) Accionar el ventilador y con la ayuda de la mampara (regulador de tiro) se ajusta la entrada de aire
- 2) Introducción del vapor., con la ayuda de la valvula maestra del equipo de secado se introduce el medio calentante y se regula a presiones no mayores de 3 bares.  
Para llevar a cabo este punto es necesario que un operario se mantenga al pendiente, ya que durante el secado existen variaciones que podrían modificar sustancialmente la presión de vapor requerida
- 3) Colocación de las charolas., Previa estabilización del sistema AIRE-VAPOR, se introducen a la camara de secado las charolas con el material listo para su secado. La cantidad de sólido a secar no debiera sobrepasar la capacidad de peso de la balanza

- 4) Con este inciso se cumplen las operaciones básicas para el principio de un buen secado. Sólo es bueno mencionar que a partir de éste punto las tomas de tiempo para el cambio de peso del material durante el secado se llevarán de acuerdo al aspecto físico como: Porosidad, solubilidad, sensibilidad al calor etc., los rangos de tiempo promedio son de 10 minutos para cualquier material escogido.

#### MATERIAL AUXILIAR EN EL SECADOR INTERMITENTE DE CHAROLAS:

- Termómetro de búlbo húmedo y seco
- Provetas de 2000 ml. para recolección de condensados
- Cronómetro, espátula y proveta de 100 ml. (para humedecer el material a secar).
- Balanza de humedad y granataria
- Cualquier material de limpieza (cubetas, franela, etc.)
- Cuchara de albañil
- Recipiente para la preparación de la muestra
- Escalera para la toma del cambio de peso en la balanza

#### DIMENSIONES DE LA UNIDAD:

Los elementos más importantes del secador intermitente de charolas son:

- Los tubos de calentamiento consisten en una hilera de tubos en forma horizontal de cobre de 1/2" (12.5 mm), con aletas de bobina espiral de diámetro externo 1.75" (45 mm.). El área efectiva de superficie es de 2.423-- $\text{ft}^2/\text{ft}$  (.74  $\text{m}^2/\text{m}$ ), dando una area de transferencia de calor efectiva de 19.4  $\text{ft}^2$  (1.80 $\text{m}^2$ ). Ducto del aire de salida con dimensiones de 9.25" D. (2.35mm.).

La camara de secado es de acero inoxidable y está formada por una sección cubica conectada con los ductos de entrada

y salida de aire, la sección cúbica esta provista de una pequeña puerta de acero, donde sirve la introducción de las ch arolas junto con el material húmedo.

El transporte del aire para secado se efectua a través de los ductos de acero inoxidable y por medio de un ventilador axial de 1/2 hp.

Por último la mínima alimentación de vapor requerida es de 35 lb/hr (16 Kg/h) a 30 psi (3 bar) .

FIGURA X-1

## SECADOR INTERMITENTE DE CHAROLAS

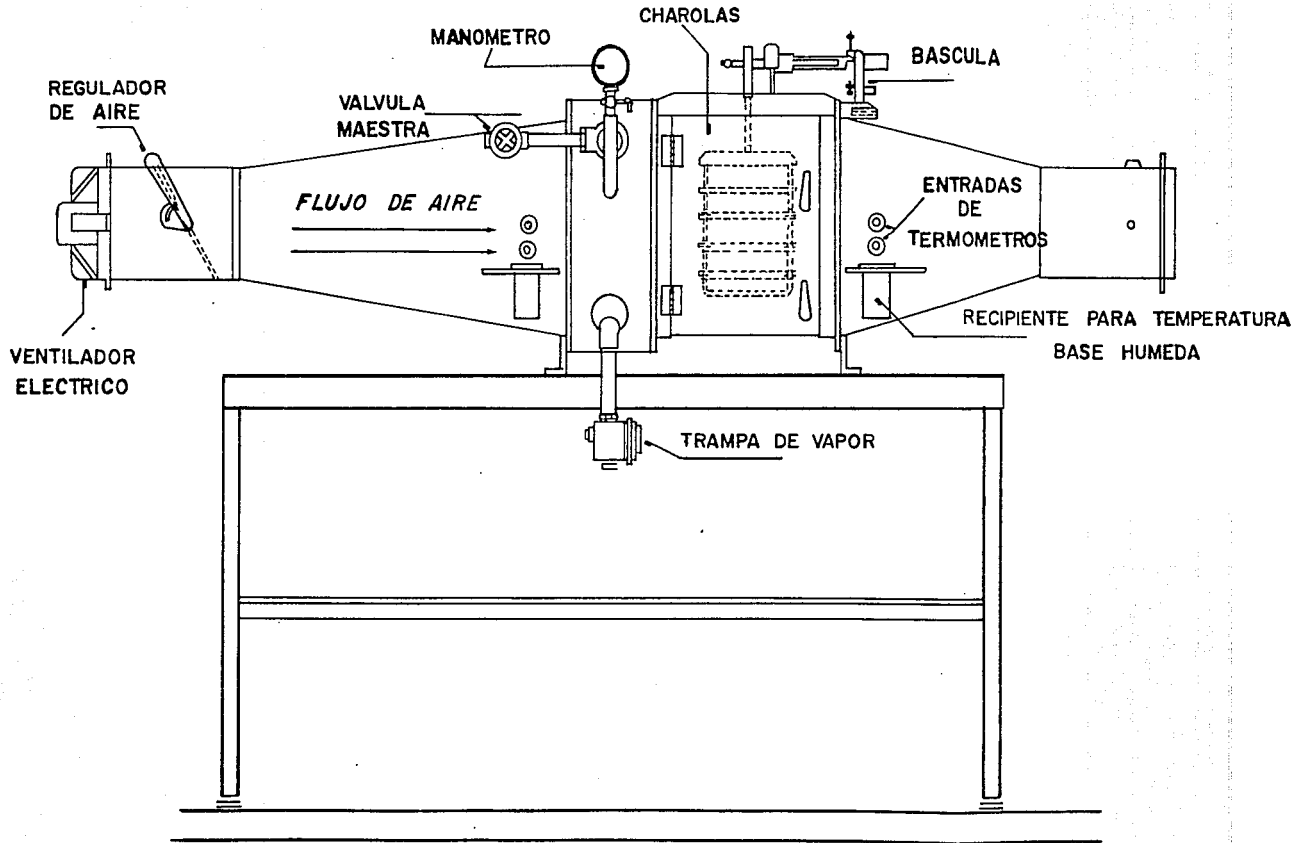
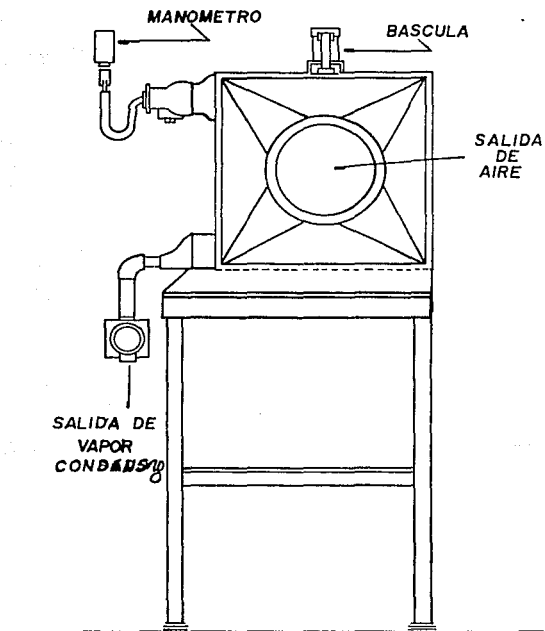


FIGURA X-1 (Continuación)

## SECADOR INTERMITENTE DE CHAROLAS



## CAPITULO VIII

**PARTE PRACTICA:  
ANALISIS, APLICACION Y EXPERIMENTACION**

## ANÁLISIS, APLICACION Y EXPERIMENTACION

## ANÁLISIS:

El proceso de transferencia de calor entre la corriente de -  
aire y el vapor involucra los siguientes pasos individuales:

- a) Transferencia del vapor en condensación, a través de una capa de condensado, a la pared interna del tubo calentador (serpentin).
- b) Conducción a través de la pared metálica del tubo (serpentin), a la superficie exterior.
- c) Convección de la pared externa del tubo a la corriente -- del aire.

Cada uno de estos tres pasos es caracterizado por un coeficiente individual de transferencia de calor, y en general están relacionados con el coeficiente global  $U$  por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{X}{K} + \frac{1}{h_a} \quad \dots \quad 8.1$$

Donde:

$h_s$  = Coeficiente del lado del vapor en condensación

$X$  = Espesor de la pared del tubo

$K$  = Conductividad térmica del tipo del material del tubo

Sin embargo., la ecuación anterior sólo se aplica si el área de la superficie interna y externa del tubo, es aproximadamente la misma.

Los tubos de calentamiento para éste tipo de equipo, tienen aletas en forma de bobina espiral en la cara externa, lo que aumenta la diferencia en esta área. Los tubos están hechos - de cobre, cuya conductividad es alta, es posible ignorar el término medio de la ecuación global, a menos que se requiera

estimaciones muy exactas.

Si el coeficiente global de transferencia de calor "U", es definido con base al área externa "A<sub>a</sub>" de los tubos y aleas entonces tenemos:

$$Q = U A_a (T_s - T_a) \quad \dots \quad 8.2$$

donde:

Q = Velocidad de transferencia de calor

T<sub>s</sub> = Temperatura del vapor

T<sub>a</sub> = Temperatura del aire

Para áreas internas y externas diferentes y despreciando el término de conductividad, la ecuación 8.2 es:

$$\frac{1}{U} = \frac{A_s}{h_s A_s} + \frac{1}{h_a} \quad \dots \quad 8.3$$

donde;

A<sub>s</sub> = Área de la superficie interna

Para una temperatura de vapor dada (y para presión de vapor saturado), h<sub>s</sub> no varía grandemente con las condiciones en el lado del aire. Si éste es el caso y teniendo en mente que el coeficiente del lado del aire h<sub>a</sub> será alguna función de la velocidad del aire U<sub>a</sub>, es posible reducir la ecuación 8.3 a:

$$\frac{1}{U} = C_1 + \frac{1}{C_2 U_a^n} \quad \dots \quad 8.4$$

donde:

C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> son esencialmente constantes si las propiedades como M.P. K son corregidas por la temperatura.



Por lo tanto,  $1/U$  (obtenido de la ecuación (8.2) experimentalmente) es graficado contra  $1/U_a$  en un papel logarítmico, para poder deducir el exponente "n", también los valores de  $C_1$  y  $C_2$  pueden ser evaluados, como la intercepción y pendiente en una gráfica de " $1/U$ " contra " $1/U_a$ ".

Los objetivos de ésta experiencia práctica pueden ser resumidos como:

- DETERMINACION DE "U" EXPERIMENTALMENTE, COMO FUNCION DE LA VELOCIDAD DEL AIRE
- COMPARACION DE LOS VALORES CALCULADOS DE " $h_s$ " CON VALORES PUBLICADOS EN LA LITERATURA. EN VISTA DE LA PROBABILIDAD DE QUE " $h_s$ " SEA MUCHO MAYOR QUE " $h_a$ ", LA DETERMINACION -- "U" ES UNA APROXIMACION A LA DETERMINACION DE " $h_a$ ", Y POR LO TANTO, LOS VALORES PUBLICADOS DE " $h_a$ " PUEDEN SER COMPARADOS CON ESTIMACIONES EXPERIMENTALES

#### APLIACION Y EXPERIMENTACION

Antes de proceder con un experimento práctico y demostrativo de Secado, primero sera necesario calibrar la balanza -- montada en la parte superior del equipo de secado. Una gráfica relacionando la distancia de las pesas deslizantes al pivote, con masas añadidas a la plataforma deberan ser construidas tomando en cuenta, desde luego el peso tara de los platos secos. Esta calibración debe llevarse a cabo son pasar aire por el secador.

Habiendo construído la carta de calibración de la balanza, se debe seleccionar el material adecuado para estudios de secado., para esto se recomienda que se use un sólido granular no poroso, por que si se seleccionara un material permeable a la humedad., por ejemplo fibras de madera, el tiempo de secado sería excesivamente muy largo. Experimentos -- realizados sugieren que arena cribada con malla relativamente cerrada malla 60-B.S. es un material adecuado a secar.

La arena (aproximadamente será necesario 1 Kg. de arena seca) se deberá secar extremadamente y después ya seco pesar. Se deberá dejar algún tiempo bajo el agua, para saturar todos los intersticios. La masa de arena húmeda debe ser sacada de la vasija donde la saturación fué llevada a cabo y -- después de un drenado final para remover el exceso de agua libre en exceso (para prevenir goteo). Ahora bién se procede a pesar este producto humedo en la balanza del secador o en su caso en otra balanza externa. La arena debe ser arreglada uniformemente en los platillos con el mismo nivel de superficie e igual espesor en todos los platillo. Es importante que nada de arena sea salpicada durante la operación de carga., el peso debera ser checado en la balanza del secador antes de que comience la operación.

El mismo procedimiento que el usado para el experimento de transferencia de calor descrito anteriormente puede seguirse ahora.

En adición a las lecturas mencionadas más adelante, sera necesario tomar los datos siguientes a varios intervalos de tiempo: Temperatura de bulbo húmedo y seco del aire tanto de entrada como de salida de la sección del aire.

#### IMPORTANTE:

Para entrar de lleno al secado es importante tomar las siguientes observaciones:

- Para realizar un experimento de secado que muestre la mayoría de las características de las curvas típicas de velocidad de secado, sera necesario varias horas.
- Si se intenta realizar un balance de energía entre el calor alimentado al banco de tubos por el vapor en condensación y el cambio de entalpía del aire, será necesario hacer una corrida en blanco sin flujo de aire para estimar las pérdidas de calor del aparato a los alrededores.
- También si se quiere realizar un balance de energía entre el cambio de entalpía del aire a través de la sección de secado y la pérdida de humedad de la arena, (masa de agua evaporada por calor latente de vaporización) también es necesario hacer una corrida en blanco, sin arena húmeda pre-

sente y tomando lecturas de las condiciones de entrada y salida del aire para la sección de secado del equipo.

#### CALCULO DEL TIEMPO DE SECADO

A partir de los resultados obtenidos se puede construir una curva de secado de contenido de humedad del sólido, masa de líquido sobre masa del sólido seco contra tiempo.

En cálculos que envuelven el secado, la curva de velocidad de secado deben ser considerados por secciones, porque los factores controlantes difieren en las partes de la curva. - la velocidad de secado se define como:

$$R = \frac{-W_s d\bar{X}^1}{A d\theta} \quad \dots \quad 8.5$$

donde:

R = Velocidad de secado, masa de líquido evaporado por hora, por unidad de área de superficie sólida.

W<sub>s</sub> = Peso del sólido seco

$\bar{X}^1$  = Contenido de humedad en el volumen del sólido, masa del líquido entre masa del sólido seco.

A: Área de superficie del sólido expuesta a la corriente de aire

Esta ecuación puede ser reareglada e integrada para obtener el tiempo de secado:

$$d\theta = - \frac{W_s}{A} \frac{d\bar{X}^1}{R} \quad \dots \quad 8.6$$

Donde:  $\bar{X}_1^1$  : Contenido de humedad al tiempo  $\theta_1$

$\bar{X}_2^1$  : Contenido de humedad al tiempo  $\theta_2$

## PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE:

En este período  $R$  será constante e igual a  $R_c$  y la integración de la ecuación anterior será:

$$\theta = - \frac{W_s}{A} (\bar{X}_c' - \bar{X}_1') \dots 8.7$$

donde:

$\bar{X}_c'$  = Contenido de humedad al final del período de velocidad constante, masa de agua entre masa de sólido seco

$\bar{X}_1'$  = Contenido de humedad al inicio del proceso de secado

$\theta_c$  = Tiempo de velocidad de secado constante, en horas.

$R_c$  dependerá de los coeficientes de transferencia de masa y calor del medio secante a la superficie del sólido:

$$R_c = K_y (Y_I - Y_V) M_a = \frac{h_v}{\lambda} (T_v - T_I) \dots 8.8$$

donde:

$M_a$  = Peso molecular del vapor de agua

$\lambda$  = Calor latente de vaporización, energía por mol

$Y_v$  = Fracción mol del vapor de agua en la corriente gaseosa

$K_y$  = Coeficiente de transferencia de masa de su superficie de evaporación al seno de la fase gaseosa

$h_v$  = Coeficiente de transferencia de calor desde la superficie de evaporación al seno de la fase gaseosa.

Como todo el calor será transferido mediante los mecanismos de conducción en el interior del sólido, convección en el seno del gas y radiación a los alrededores, el calor total transferido  $q_t$  es:

$$q_t = h_v A (t_v - T_i) = h_c A (T_v - T_i) + h_r A (T_w - T_i) + U_k A (T_v - T_i) \dots 8.9$$

donde:

$h_c$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas a la superficie del sólido

$h_r$  = Coeficiente para la transferencia de calor radiante entre la superficie del material y las paredes de la cámara de secado

$U_k$  = Coeficiente global de transferencia de calor hacia la superficie secada por convección y conducción a través del lecho hacia la superficie de evaporación

$T_w$  = Temperatura de las paredes del espacio de secado

$T_v$  = Temperatura del gas de secado

$T_i$  = Temperatura de la interfase gas-líquido

Si las paredes de la cámara de secado están a la temperatura del gas:

$$h_v = h_c + h_r + U_k \dots 8.10$$

En la mayoría de los casos, el calor transferido por radiación y conducción a través del lecho es despreciable. Por lo que el coeficiente total de transferencia de calor, es esencialmente un coeficiente de convección y puede ser correlacionado en la forma usual, con el factor "j", de esta manera:

$$\frac{h_v}{C_p G_v} Pr^{2/3} = b \frac{D G_v^n}{H} \quad \dots \quad 8.11$$

donde:

- Gv = Flujo másico de aire por unidad de área  
 D = Diámetro u otra unidad de dimensión característica

Existen pocos datos disponibles que permitan fijar las constantes de la ecuación anterior con certidumbre. Casi todos los experimentos reportados usan aire como medio secante, -- por lo que los resultados no pueden ser usados para corroborar el exponente en el número de Prandtl. El exponente 2/3 ha sido probado satisfactoriamente para secado en vapor sobrecalentado y para la evaporación del alcohol butílico, agua, benceno en sus vapores sobrecalentados. Aplicando los resultados en la ecuación anterior:

$$\frac{h_v}{D_p G_v} Pr^{2/3} = 26.6 \frac{D G_v^{-0.7}}{H} \quad \dots \quad 8.12$$

Para secado con aire, los resultados de experimentos extensivos se han correlacionado con:

$$h_v = 0.0128 G_v^{0.8} \quad \dots \quad 8.13$$

Donde: "h<sub>v</sub>" tiene unidades de BTU/h.ft<sup>2</sup>. °F y G<sub>v</sub> de lb/h.ft<sup>2</sup>

La ecuación anterior es recomendada para determinar el coeficiente

-ficiente durante el período de velocidad constante, cuando el aire es el medio secante., en este caso, la temperatura de la superficie (T<sub>1</sub>) puede ser tomada como la temperatura de bulbo húmedo del aire.

#### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental a seguir es:

- a) Regular la presión del vapor en el banco de tubos con el valor deseado., dentro del rango de 0 - 30 psig ( 0 - 3 BAR)
- b) Pasar el aire sobre los tubos a la velocidad deseada,- hasta que se observe la estabilidad de las temperaturas del aire a la entrada y a la salida así como la constancia del flujo de condensado
- c) Después de que el equilibrio se ha alcanzado, tomar datos que a continuación se detallan a intervalos frecuentes de tiempo:
  - temperatura de la corriente de aire (entrada y salida)
  - Velocidad del aire (mantenerla constante)
  - Cantidad de vapor condensado (mantenerla etc.)

Variación del peso en la balanza de acuerdo al tiempo - transcurrido., repetir el experimento a diferentes velocidades del aire. Si se desea repetir todo el procedimiento para diferentes presiones de vapor.
- d) Para cada presión del vapor, determinar las pérdidas de la humedad de calor de la unidad, sin pasar aire por -- los tubos, haciendo una corriente en blanco.

Es usual estimar el coeficiente de película para superficies de tubos aletados, en base a la efectividad de la aleta definida como la razón de la transferencia de calor real para la superficie extendida entre la transferencia de calor que ocurriría si las aletas fueran removidas.

Esta última cantidad puede ser calculada con correlaciones publicadas de coeficientes de transferencia de calor para flujo cruzado en un banco de tubos.

## EXPERIMENTACION

De la experimentación llevada a cabo en el laboratorio de Ingeniería Química se incluye en la presente tesis un detalle informativo que resalta las cualidades del equipo como guía para una experimentación de cualquier sólido.

Los datos propuestos serán y servirán únicamente como ejemplo para trazado de curvas y programación de datos en tablas.

MATERIAL: Orgánico ó Inorgánico

COMPUESTO: XXXXXXXX

Características:

Si el material presenta forma granulosa, se dara su análisis granulométrico.

Por ejemplo el XX% de la muestra paso por la criba US. STD. No. XXX (XXX en micras).

Si la muestra se preparó por extensión, se daran las medidas de una unidad.

Si se preparó por otro medio, también se daran medidas.

Color anterior del Secado: XXXXXXXX

Color después del secado: XXXXXX

Observaciones en la textura y color: XXXXXXXX

El material a secar se preparo a obtener una masa de aproximadamente XX% de humedad base húmeda.

Area de las charolas (C/U): 384.16 cm<sup>2</sup>

Espesor del material de la charola: 0.5 cm



Peso de la charola: 460.05 g.

Peso de la charola con material húmedo: 550.05 g.

Peso del material húmedo: 90 g.

Peso del material seco, determinado en estufa

a 110 °C durante 1 hora: 28.7 g.

Cantidad de agua evaporada: 61.3 g.

Temperatura promedio del bulbo seco de entrada: 18 °C

Temperatura promedio del bulbo húmedo de entrada: 11 °C

Temperatura promedio salida camara de secado: 41 °C

Temperatura promedio entrada camara de secado: 41 °C

Temperatura promedio búlbo seco a la salida: 40 °C

Temperatura promedio bulbo húmedo a la salida: 28 °C

Velocidad promedio del aire a la salida: 91.5 °C

Los datos obtenidos durante el secado, se encuentran tabulados en la tabla I.

#### Cálculos:

Algo común y práctico es llevar los datos obtenidos en la práctica de laboratorio a tabularlos., como se presenta en la tabla II., los cuales estan basados a su vez en los datos de la tabla I.

De la tabla I el peso de la muestra fué graficado contra el tiempo, obteniendose la curva que aparece en la figura 4.

El contenido de humedad en base seca fué graficado contra el tiempo obteniendose la curva de la figura 5.

El Contenido de Humedad es calculado como:

$$\frac{\text{PESO DE LA MUESTRA HUMEDA} - \text{PESO DE LA MUESTRA SECA}}{\text{PESO DE LA MUESTRA SECA}}$$

La curva de la figura 4 es diferenciada graficamente obteniendose la curva de secado mostrada en la figura 6, los cálculos que incluyen esta diferenciación estan dados en la tabla 11, columna 1 al 5. Los datos de ésta tabla se comenzaron a considerar a partir del minuto 37 ya que es aquí donde la curva de

la figura 4 muestra la inflexión del final del período de velocidad constante.

Los valores  $dW / dB$  leídos de la figura 6 e incluidos en la columna 6 de la tabla II se convierten a  $g/hr.cm^2$  - por medio del factor  $min/hr \times 1/cm^2$ , el cual es 0.1561, obteniéndose de la columna 7, tabla II.

Las velocidades de secado, columna 7, son graficadas contra el contenido de humedad base seca, obteniéndose la figura 7. El contenido de humedad base seca se obtuvo de la manera como se explicó anteriormente.

## RESULTADOS

Como base de las figuras 4, 5, 6 y 7 fué posible en forma gráfica, determinar para éste material períodos de velocidad de secado del mismo., el período A - B es el período de velocidad constante, se mantuvo de la humedad inicial - hasta la humedad de 1.227 g. de agua / g de s.s., el período B - D es el período de velocidad decreciente. El tiempo total de secado resultó 140 minutos, de los cuales corresponden 33 minutos al período de velocidad constante y 107 minutos al período de velocidad decreciente para las condiciones pre-fijadas. La velocidad de secado en el período de velocidad constante fué de  $0.119 g/hr cm^2$ , la humedad crítica de 1.225 g de agua/g de s.s..

Como comentario para las flexiones de la curva, observamos en la figura 7, que es posible obtener el contenido de humedad crítica del material, ésto significa que la superficie del sólido comienza a aparecer insaturada, lo que -- produce un abatimiento en la velocidad de secado, dando -- por resultado el principio de velocidad decreciente.

Como puede apreciarse en la figura en cusion el material contiene el agua superficial que da origen al período de velocidad constante, de la misma forma se puede observar - que en el material han existido las transferencias de masa por capilaridad y difusión ya que, en el período de velocidad decreciente es posible observar la separación de los dos períodos.

TABLA No. 1

## DATOS EXPERIMENTALES

Determinación	(1) horas a.m.	(2) Tiempo en minutos	(3) minutos 0	(4) peso muestra en g.	(5) humedad g/g s.s.
1	8.00	0	--	90.0	2.135
2	8.10	10	10	82.96	1.890
3	8.20	20	10	73.81	1.571
4	8.30	30	10	65.50	1.282
5	8.40	40	10	61.48	1.142
6	8.50	50	10	57.00	0.986
7	9.00	60	10	53.62	0.868
8	9.10	70	10	49.39	0.720
9	9.20	80	10	43.84	0.527
10	9.30	90	10	37.66	0.312
11	9.40	100	10	34.84	0.213
12	9.50	110	10	32.50	0.132
13	10.00	120	10	32.00	0.114
14	10.10	130	10	31.50	0.097
15	10.20	140	10	29.30	0.020

TABLA No. 11

## C A L C U L O S

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
$\theta$ minutos	$\theta$ minutos	peso de muestra gramos.	W g.	W/ $\theta$ g/min	dW/d $\theta$ g/min	veloc. de secado. g/hrcm <sup>2</sup>	agua evap. gramos (g)	Humed. base seca. g. agua/g.s.s.
0		90.0			77	120	61.3	2.135
33	33	64.5	25.5	77	77	120	35.8	1.260
42	9	58.9	5.6	62	64	99	30.2	1.052
50	8	54.5	4.4	55	55	85	25.8	0.898
60	10	49.5	5.0	50	45	70	20.8	0.724
70	10	45.0	4.5	45	38	59	16.3	0.567
74	4	43.5	1.5	37	36	56	14.8	0.515
80	6	41.5	2.0	33	33	51	12.8	0.445
90	10	38.4	3.1	31	29	45	9.7	0.337
100	10	35.5	2.9	29	27	42	6.8	0.236
110	10	33.0	2.5	25	23	35	4.3	0.149
116	6	31.7	1.3	21	19	29	3.0	0.104
123	7	30.5	1.2	17	15	24	1.8	0.062
130	7	29.5	0.9	12	1	15	0.9	0.031

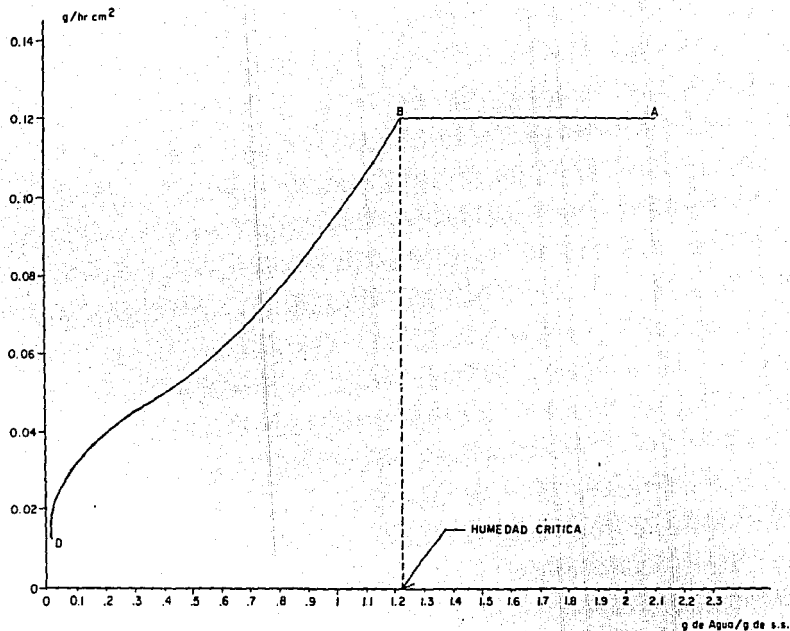


FIG. 7. VELOCIDAD DE SECADO VS. HUMEDAD  
BASE SECA

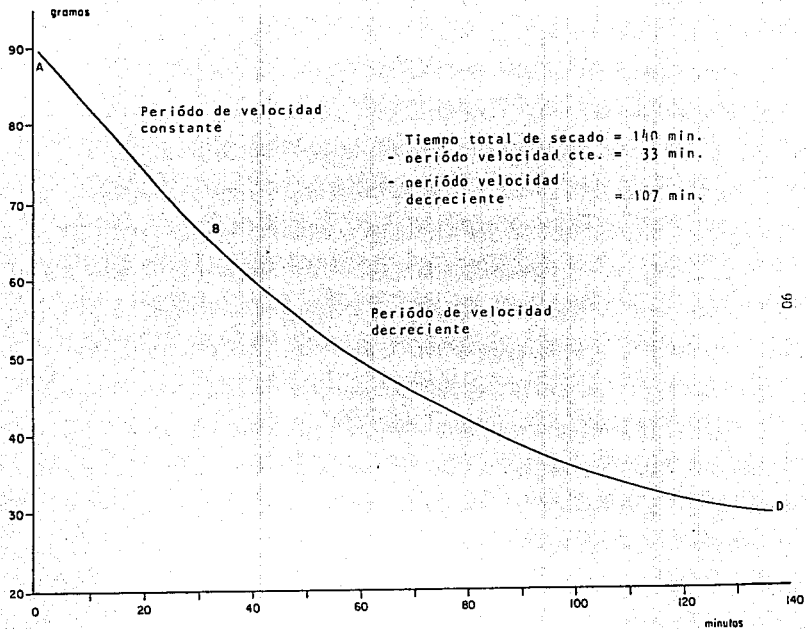


FIG. 4. PESO DE LA MUESTRA VS. TIEMPO

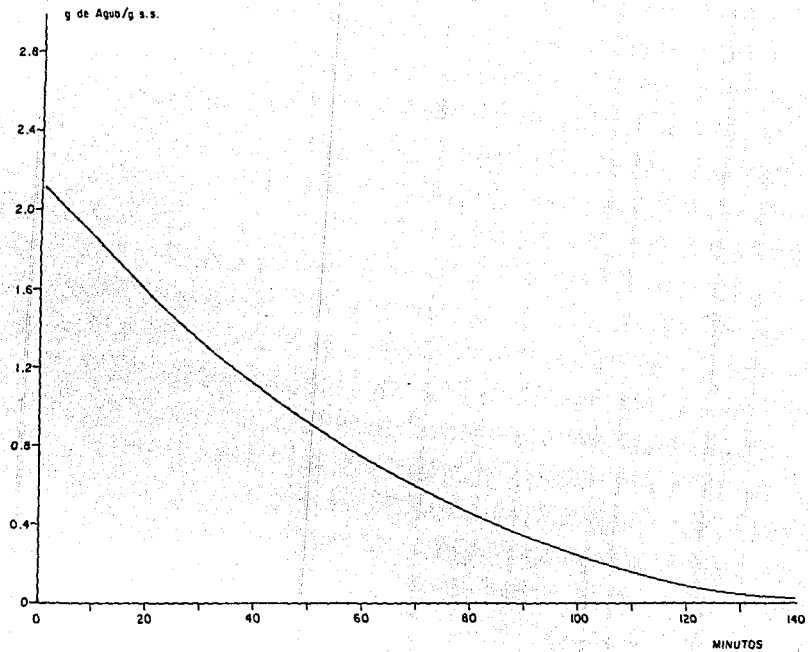


FIG. 5 CONTENIDO DE HUMEDAD BASE  
SECA VS. TIEMPO

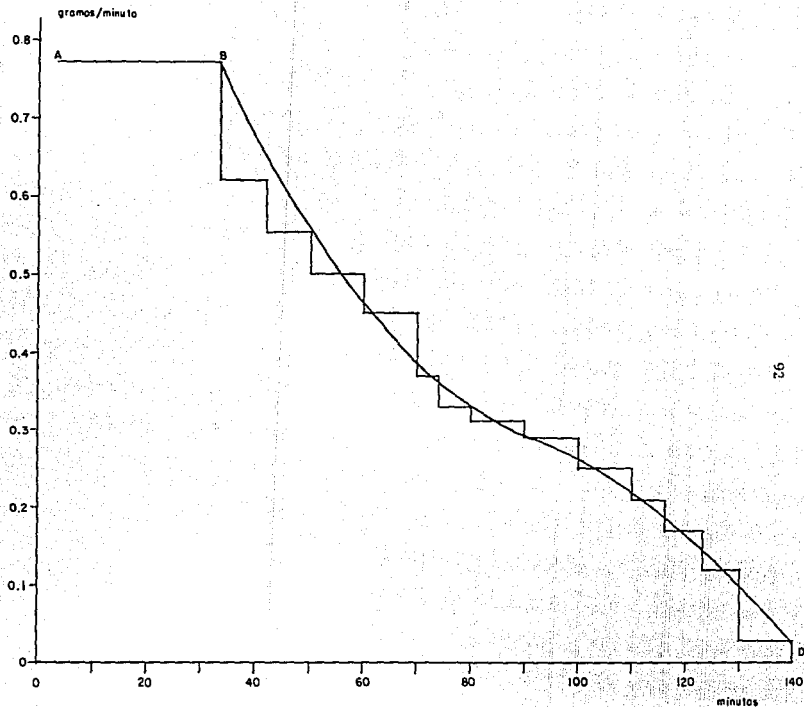


FIG. 6. VELOCIDAD DE SECADO VS. TIEMPO



## CAPITULO IX

## CONCLUSION .

**CONCLUSIONES.-**

Técnicas y estimaciones de parámetros medibles para el secado de materiales inorgánicos en un secador intermitente de charolas para un laboratorio de pruebas es el tema que aquí hemos tratado., se han especificado técnicas al manejo del equipo de secado de charolas como: controles automáticos y manuales, -- preparaciones de muestras, control de variables internas y externas durante el proceso de secado., hemos sido capaces de interpretar en base a una experiencia de prueba real el manejo de gráficos y cálculos para concluir esquemáticamente las variables que envuelven a un sólido mojado desde su período inicial de secado hasta el final.

El secador de charolas que ha sido utilizado para este fin, nos presenta un campo de aplicación general, ya que es utilizado -- para secar casi cualquier tipo de material. Su costo operativo es alto debido a que el trabajo requerido es relativamente grande y esta consideración restringe su uso a producciones inferiores a 50 Kg/h. de material seco. Este tipo de secador es recomendado particularmente en aquellos casos donde se manipula -- una gran cantidad de productos diferentes, siendo relativamente pequeña la producción de cada uno de ellos, por ejemplo, colorantes y productos farmacéuticos.

Siendo éste secador discontinuo es fuertemente recomendable para secar la pasta obtenida en los filtros prensa que son discontinuos y de uso común en estos procesos. La limpieza es fácil, reduciéndose a veces a lavar las charolas fuera del secador, y en caso de necesidad, es fácil construirlas de materiales resistentes a la corrosión.

Para el tratamiento teórico que se ha expuesto existen limitaciones., es posible hacer una estimación razonable del funcionamiento del secador en el período de secado constante, mediante el uso de las conocidas ecuaciones para la transferencia de masa y calor y con un sencillo balance de materia para el caso particular de circulación de aire. Sin embargo, es prácticamente impo

sible hacer alguna predicción para el período de velocidad decreciente sin datos experimentales sobre el secado del material. Aun con estos datos, el cálculo del funcionamiento del secador a escala natural con un material dado requiere una cantidad de simplificaciones, además es aritmeticamente complicado por el cambio de las condiciones operativas durante el ciclo de secado. Por otra parte es muy sencillo hacer pruebas de secado a escala natural en un secador simple y flexible de este tipo y se recomienda hacerlo siempre que sea posible. Si no se puede llevar a cabo pruebas reales, puede deducirse el funcionamiento por analogía con materiales similares, de comportamiento conocido durante el secado a gran escala. En general, con los conocimientos aquí adquiridos sobre el manejo de estos tipos de secadores o los que se tienen en la actualidad, cualquier intento de calcular el funcionamiento de un secador mediante consideraciones teóricas o a partir de datos de laboratorio solamente, puede considerarse tedioso y poco seguro, y por esta razón no es recomendable.

Se ha detallado el efecto de la temperatura y de la humedad en la torta de material a secar en este secador de charolas por medio del calor que es transportado hasta el material mediante aire caliente y el agua es eliminado como vapor en la corriente de aire. Cuando la transferencia de calor se realiza totalmente por convección (como sucede con frecuencia), la velocidad de secado, durante el período de velocidad constante, podrá expresarse cuantitativamente en base a la temperatura y humedad del gas de secado.

Está claro que, aun en el período de velocidad decreciente, el material tenderá a secar más rápido a mayor temperatura y menor humedad (excepto posiblemente, en el caso de endurecimiento del material con formación de una capa superficial de baja permeabilidad), pero la velocidad de secado es controlada realmente por la velocidad de transferencia de la humedad hacia la superficie, donde se produce la evaporación. Durante el secado la temperatura superficial aumenta desde la temperatura de bulbo húmedo, hasta la temperatura de bulbo seco del gas de secado, y la ---

transferencia de calor por convección hacia la superficie disminuye en forma correspondiente, a pesar de que el coeficiente de transferencia de calor permanece constante.

La velocidad de la corriente de gas de secado afectará a los coeficientes de transferencia de calor y materia de tal manera que si se mantiene constante los otros factores, el aumento de la velocidad del gas determina un aumento de la velocidad de secado. En el período de velocidad decreciente el efecto de la transferencia de calor y por lo tanto el efecto de la velocidad de aire, disminuye a medida que avanza el secado y el resultado no es fácilmente previsible., es importante mencionar también que para pequeñas velocidades del aire, cobran importancia las corrientes convectivas y en este caso no es fácil predecir el coeficiente verdadero, ni el período de velocidad constante.

Para el efecto correspondiente al espesor de la torta, la velocidad de secado constante sólo depende de las condiciones en la superficie del material y por lo tanto el espesor no influye en este valor. Sin embargo, en el período de velocidad decreciente, la velocidad de secado esta controlada por la velocidad de migración del agua a la superficie donde se produce la evaporación, y es evidente que, un incremento en el espesor provocará una disminución de la velocidad media de secado. También puede tener el efecto de aumentar la humedad crítica, con la consiguiente disminución de la velocidad de secado total, debido a la reducción del margen de secado dentro del cual obtiene la máxima velocidad. Las expresiones cuantitativas del efecto del espesor de la torta dependen entonces del conocimiento cuantitativos de los cambios de la pendiente y de la forma de la curva de secado a velocidad decreciente y actualmente no son predecibles. Sin embargo, el efecto cualitativo es evidente; la velocidad de secado total -- por unidad de área disminuirá con el aumento del espesor de la torta. Pero el peso del material en el secador aumentará proporcionalmente con el espesor de la torta y es obvio que a un espesor óptimo de carga de las charolas corresponderá la máxima velocidad de producción de material seco para una condición de secado dadas. Es muy importante admitir la existencia de esta carga óptima al especificar las condiciones de operación de un secador de charolas a presión atmosférica .

Nuestro secador de charolas a presión atmosférica opera en forma discontinua, por lo tanto las condiciones de secado varían durante cada ciclo. Como notamos en el contenido, los parámetros importantes son la velocidad, la temperatura y la humedad del gas de secado, y el peso de material por unidad de superficie. De ellos sólo la velocidad y la condición del gas de secado son fáciles de variar durante una operación dada, en un aparato determinado. La velocidad de aire se controla habitualmente y en este caso con un ventilador y en la práctica es independiente de la temperatura y composición del aire. También es independiente del grado de recirculación, que sólo sirve para variar la composición del aire y, en general puede suponerse que no habrá variación durante el ciclo de secado, a menos que se impongan intencionalmente. La humedad dependerá de la proporción de aire recirculado dentro del secador y la velocidad de secado en un determinado instante. Será teóricamente posible controlar la recirculación durante el ciclo de secado de manera que se mantenga en el aire de salida una humedad constante, y cercana a la saturación. Esta manera de operar aumenta el grado de recirculación a medida que disminuye la velocidad de secado en el ciclo y correspondera a la máxima eficiencia térmica de la operación, con mantenimiento de la humedad practicamente constante en el secador.

Esto finalmente nos ha dado la gran pauta e importancia de un diseño correcto para un secador de charolas., su manejo descriptivo y como parte adicional de tal importancia los parámetros físicos de la muestra inorgánica representada en sus variados gráficos y tablas nos dan los objetivos planteados antes de iniciar este trabajo.

Agradezco con apreciable admiración a todas las gentes que influyeron directa o indirectamente en la realización de este tema.





**BIBLIOGRAFIA:**

- 1) Perry, J.H. Chilton, C.H.  
Chemical Engineers Handbook  
Mc. Graw Hill., 5a. Edición, 1973
- 2) Ocon, G.J., Tojo, B.G.  
Problemas de Ingeniería Química  
Tomo 11., 6a. Edición  
Editorial Aguilar, Madrid 1984
- 3) Treybal R.E.  
Operaciones de transferencia de masa  
Mc. Graw Hill Book Co., Inc.  
New York, 1984
- 4) Foust A.S.  
Principios de Operaciones Unitarias  
Mexico., Ed. Continental 1985
- 5) Crosby E.J.  
Experiments in Transport Phenomena  
Ed.-John Wiley & Sons, Inc.  
New York, 1982
- 6) Faíres V.M.  
Problems on thermodynamics  
The Mc Millan Company  
New York., 1984
- 7) Rase, H.F., Barrow, H.H.  
Ingeniería de proyecto para plantas  
de proceso.  
Ed. Cía. Editorial Continental  
Mexico., 1982.
- 8) Vian, O.A., Ocón, G.J.  
Elementos de Ingeniería Química  
(Operaciones Básicas)  
Ed. Aguilar, Madrid 1982.



- 9) Henley J.E. & Rosen M.E.  
Material and Energy Balance Computations  
John Wiley & Sons, Inc.  
New York, 1982
- 10) Stoever, H.J.  
Transmisión de Calor y sus aplicaciones  
Ed. librería del Colegio,  
Buenos Aires 1986
- 11) Welty, J.R.  
Engineering Heat Transfer  
Ed.-Wiley & Sons -  
New York 1984
- 12) Mc. Adams  
Heat Transmision  
Ed.-Mc Graw Hill Book Co.  
New York 1984
- 13) Crane Co.-Engineering and Research Div.  
Flow of Fluid through valves, fittings,  
and pipe., Chicago 1983.
- 14) Mc.Cabe and Smith  
Unit Operations of chemical Engineering  
Mcgraw-Hill Book Company.,Ed-Novaro-México  
1984 MEXICO.