

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

DISEÑO DE UN SECADOR DE TUNEL CON FINES
EXPERIMENTALES PARA EL LABORATORIO DE
INGENIERIA QUIMICA DE LA FACULTAD DE QUIMICA.

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a :

JESUS JAVIER RUBIO MARTINEZ

317



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.

CLAS. Tesis
ADQ. 1975
FECHA 1975
PROC. M-1 300



QUINTO

PRESIDENTE Prof. Ernesto Ríos Montero

VOCAL Prof. Carlos Doormann Montero

Jurado asignado
originalmente

SECRETARIO Prof. Cutberto Ramírez Castillo

Según tema

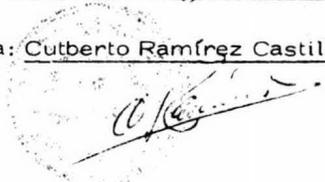
1er. SUPLENTE Prof. Antonio Frías Mendoza

2do. SUPLENTE Prof. José Guerra Recasens

Sitio donde se desarrollo el tema: Bibl. Fac. Química, Dom. del susten
tante.

Nombre completo y firma del sustentante Jesús Javier Rubio Martínez

Nombre completo y firma del asesor del tema: Cutberto Ramírez Castillo.



CON CARÍÑO

A MI MADRE

Y

A MI PADRE

A LA COMPAÑERA DE MI VIDA: CARMEN

A MIS HIJOS: EDGAR JAVIER
ADRIAN RENE
CARMEN VANESSA

A MIS HERMANOS: ALEJANDRO
MATILDE

A MIS MAESTROS

A LA FACULTAD DE QUIMICA

A MIS AMIGOS

El presente trabajo tiene por objeto el diseño y cálculo de un secador de Túnel, para el Laboratorio de Ingeniería Química, en el que, el estudiante de cualquier carrera que se estudia en nuestra facultad, podrá llevar a cabo experiencias que en forma somera, le ayudarán a conocer el funcionamiento de esta unidad utilizada en la industria. El diseño será, de un Secador de Banda con circulación atravesada, con gabinete en forma de Túnel.

La operación de Secado es de gran importancia y cada día se dedican más capital y tiempo en investigación para eficientarla y perfeccionarla, ya que es de gran utilidad en las industrias de Papel, Farmacéutica, Textil, Química y de Cerámica, siendo primordial en la Industria Alimentaria, con aplicación en la deshidratación de alimentos y Productos Agrícolas, dando mayor facilidad para preservarlos y almacenarlos, así como también para distribuirlos a la industria, al mercado de consumo o exportarlos.

El Secador en cuestión, es una ligera modificación del Secador de Túnel con carros que soportan charolas, ya que también es un Secador en forma de Túnel, con la variante de que en lugar de carros, se utiliza una banda transportadora perforada a la cual el flujo de gas secante atraviesa perpendicularmente y por

ende, al lecho del material por secar.

Tiene como característica fundamental, la de ser un Secador continuo muy versátil, debido a que dentro de ciertos límites de variación de cantidades y temperaturas de aire, así como también velocidades de banda, se pueden secar diversos materiales y obtener datos experimentales, como: curvas de secado, comportamiento, alteraciones en las propiedades físicas y químicas y en el caso de alimentos y productos agrícolas, variaciones en las propiedades organolépticas.

También tiene como ventaja la eliminación de mano de obra de carga y descarga, por medio de tolvas de alimentación y descarga directa hacia la línea de empaquetado u otra que se requiera, haciendo totalmente continua la operación.

Podemos considerar como única desventaja, que solamente se pueden secar materiales de determinada granulometría.

Esta tesis se desarrolla en siete capítulos:

I.- GENERALIDADES DE SECADO.

Presenta una idea general del Secado, Aplicaciones,

diferentes tipos de secadores y criterios de selección de los mismos.

II. TEORIA DE SECADO.

Mecanismos y procedimientos de secado, de un Secador de Banda con flujo de gas secante que atraviesa perpendicularmente a la banda y al lecho del material por secar.

III. BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA.

Obtención de todos los valores de las variables que intervienen en el diseño y cálculo del Secador.

IV. DISEÑO DEL SECADOR.

Diseño mecánico.

V. DISEÑO DE LA PRACTICA.

Breve guía para desarrollar experiencias con este equipo.

VI. CONCLUSION.

Observaciones y recomendaciones, así como algunas consideraciones económicas.

VII. BIBLIOGRAFIA.

GENERALIDADES

- I. a) Principios
- I. b) Clasificación de Secadores
- I. c) Proceso de Selección de un Secador.

GENERALIDADES DE SECADO

I. a.- PRINCIPIOS

La operación de secado consiste en la eliminación de un líquido contenido en un sólido, por medios térmicos. Los contenidos de humedad son generalmente bajos en comparación a la cantidad de sólidos, lo que diferencia al secado de la evaporación, ya que en esta operación la eliminación de líquidos es en grandes cantidades.

También podemos distinguir a la operación de secado de la filtración y de la centrifugación, porque, mientras en la primera la remoción de líquido se efectúa por medios térmicos, en las segundas la eliminación se lleva a cabo por medios mecánicos.

Para precisar el concepto de secado de las demás operaciones que se basan en la extracción de líquidos contenidos en sólidos, por medios térmicos y mecánicos, básicamente podemos expresar que al secar cualquier material le estamos disminuyendo por medio de vaporización térmica, el contenido de humedad, siempre y cuando el líquido no se encuentre en exceso.

Aunque los mecanismos de secado no se han podido conocer perfectamente en la práctica, se han diseñado equipos de secado

do que trabajan en forma eficiente, según sean las propiedades y na
turaleza del material por secar.

El diseño de equipos de secado, requiere de conocimientos, fundamentalmente, de transferencia de calor y de masa, así como también de las propiedades físicas y químicas del material por se
car. La complejidad de los mecanismos de transferencia de materia ha hecho que los estudios de secado, se basen en la transferencia de calor, es decir, la práctica ha demostrado que resulta menos difícil, calcular con mayor aproximación los coeficientes de transferencia de calor, que los de masa, datos fundamentales para el diseño adecuado.

I. b.- CLASIFICACION DE SECADORES.

Existen muchos tipos de secadores, cada uno con una determinada función. También los hay que son versátiles y en los que se puede secar más de un material húmedo. Se pueden clasificar de acuerdo al método de operación o al servicio requerido, tal como se indica en las figuras I. 1 y I. 2, sin embargo, antes de elegir un se
cador que se considere adecuado, se deberán llegar a tener un míni
mo de tres alternativas en términos de funcionamiento y economía, que nos ayuden a seleccionar el mejor, con los menores riesgos de

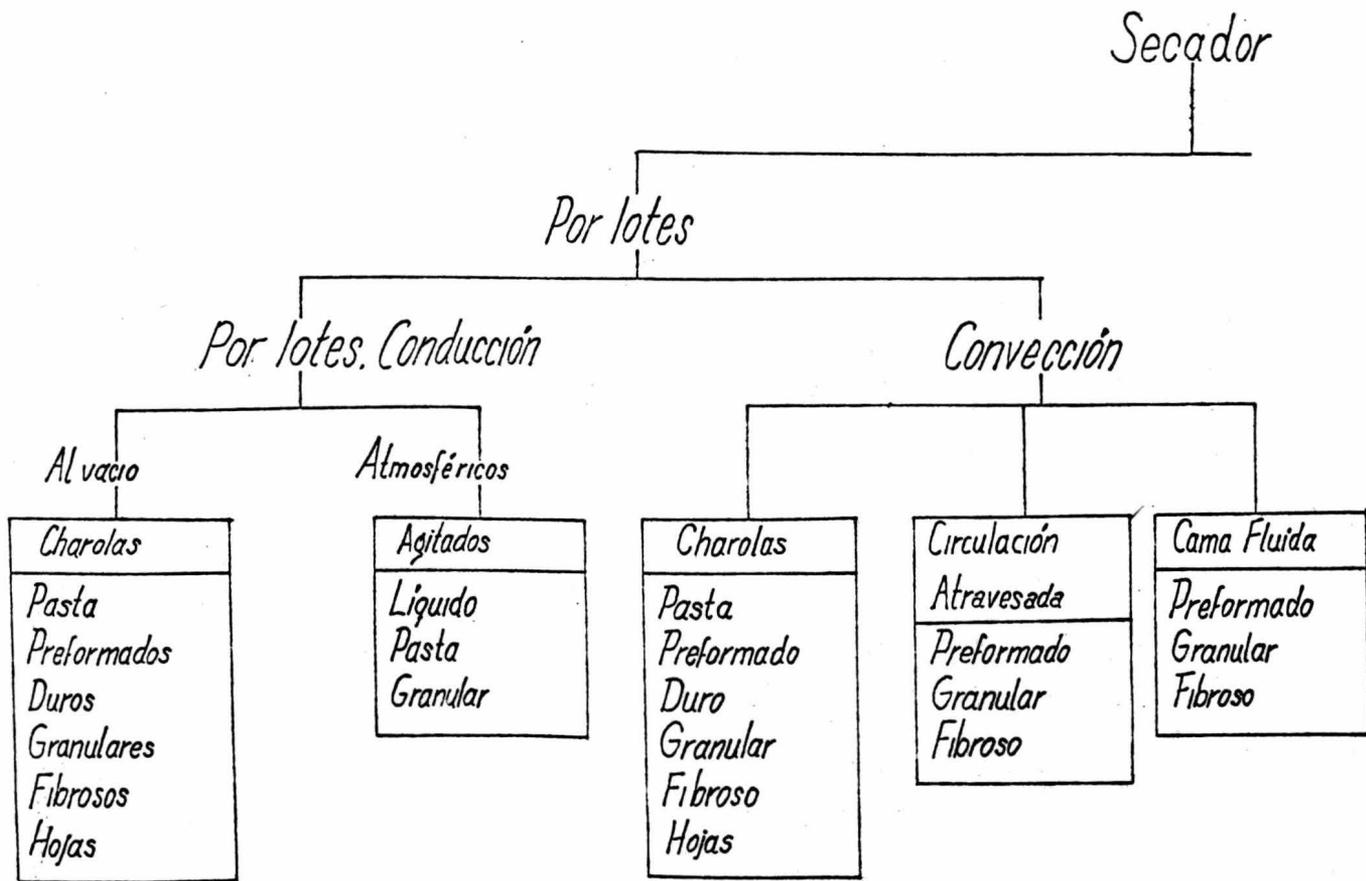


FIG. 1.1

Continuo

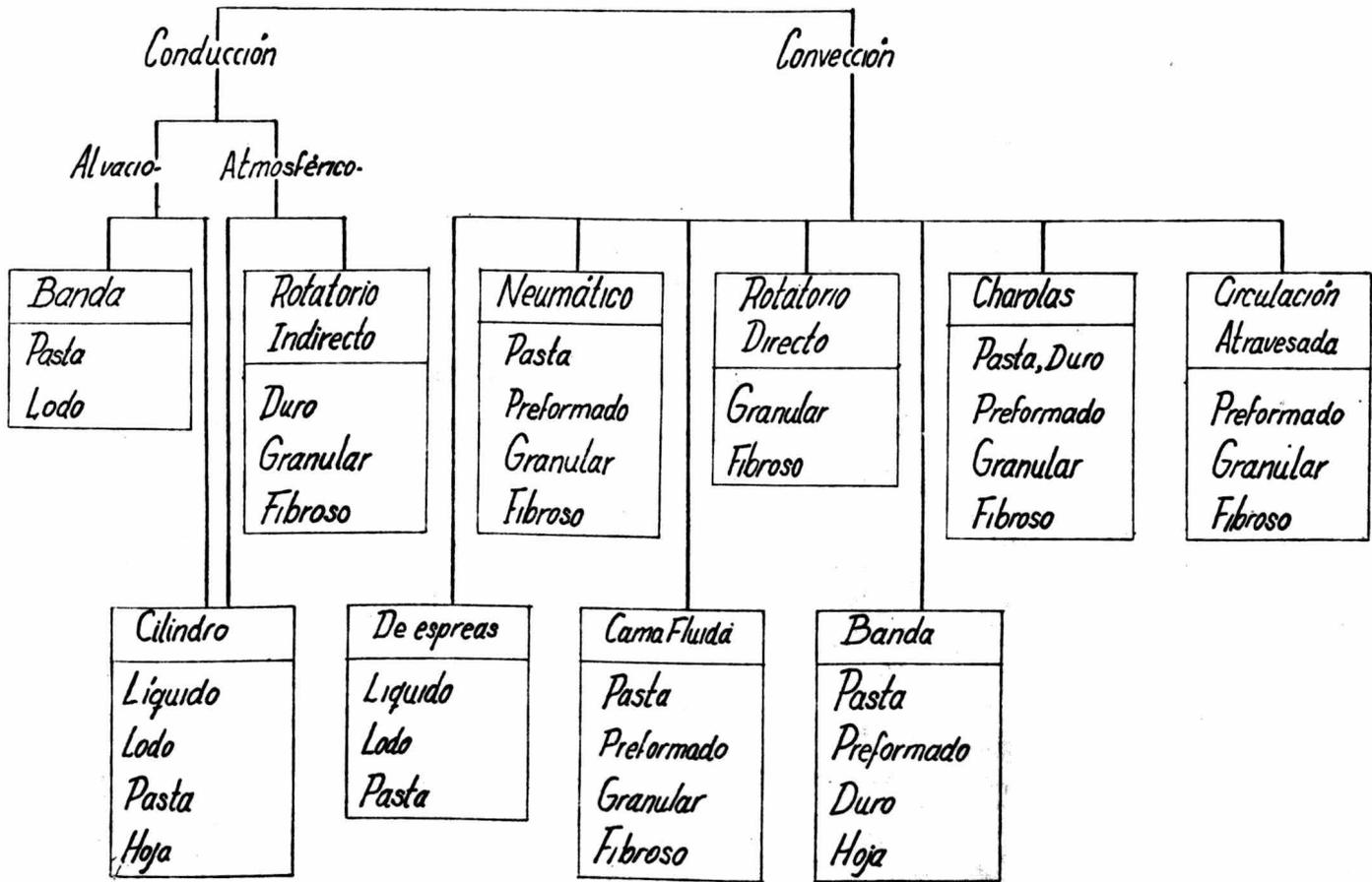


FIG. 1.2

equivocación posibles; consideraciones que serán tocadas más a fondo, en el siguiente subcapítulo.

La primera distinción, se hará de acuerdo al volúmen requerido de producción, ya que mientras algunas industrias necesitan obtener toneladas de producto seco por día, otras solamente secan algunos kilogramos.

I. b. 1.-CLASIFICACION POR EL METODO DE OPERACION.

Se pueden dividir en dos fundamentalmente: por Lotes y Contínuos, los cuales son subdivididos por el proceso caracterizante del secado, como es la transferencia de calor:

I.b.1.a).- Calentamiento por conducción.

I.b.1.b).- Calentamiento por convección.

I.b.1.c).- Calentamiento por radiación infrarroja, todos los métodos de radiación.

Los dos primeros procesos resultan algunas veces confusos, debido a la imposibilidad de definir el proceso predominante en algunas operaciones de secado, así como también el secado por congelamiento puede considerarse como un tipo especial de conducción.

En el método de operación, también podemos distinguir si los secadores se trabajan al vacío, a presión, o con algún tipo de atmósfera inerte.

En esta misma clasificación, se toma en cuenta la forma en que es alimentado el material húmedo al secador, ya que como se sabe, el secado puede considerarse una operación de acabado que precede al filtrado o centrifugación de un material. Tratándose del primer caso, algunas veces se obtienen pastas difíciles de manipular dentro del secador, y al procesarse, la superficie que entra en contacto con el gas secante o con la fuente de calor, se seca y forma una capa permeable que impide se sequen las capas subsiguientes, lo anterior, se evita dándole al material por secar, una forma determinada, como pastillas, cubos o gránulos, que en caso especial de este trabajo, facilitan, además el paso del gas al través de todo el lecho del material por secar.

La naturaleza del producto que va a ser secado, es de primordial importancia, y además de las ya mencionadas se incluyen la rigidez, flexibilidad, granulometría, solución o cristales.

I.b.2.- CLASIFICACION DE ACUERDO A LA ESCALA DE PRODUCCION.

Se divide en tres partes, que son: Pequeña Escala de 20 a 50 kg/hr, Mediana Escala de 50 a 1000 kg/hr y Gran Escala más de una tonelada por hora. A esta clasificación, también se le subdivide en lotes o contínuos. Esta clasificación se ilustra con la figura I.3.

Existen otros tipos de secadores para materiales, muy sensibles o tóxicos, que por ser demasiados específicos y de fabricación especial, no se mencionan en este trabajo.

I.b.3.- CAPITAL Y COSTOS DE OPERACION.

Los secadores pueden también ser clasificados en términos de: mano de obra, calor, versatilidad, financiamiento y operación; el costo del mantenimiento mecánico solamente puede ser estimado para cada necesidad, por medio del diseño.

FIG. I. 3

FIG. 1.3

P r o c e s o

Pequeña Escala		Mediana Escala	Gran Escala
20 a 50 kg/hr		50 a 1000 kg/hr	Más de 1000 kg/hr
Por Lotes	Por Lotes	Contínuos	Contínuos
Charolas al va <u>ci</u> o	Agitado	De banda con circulación atra <u>ves</u> ada	Rotatorio Indirecto
Agitado	Lecho Flui <u>di</u> zado		Rotatorio Directo
Circulación Atravesada		Rotatorio Indi <u>re</u> cto	De espreas
Cama Fluidiza <u>da</u>		De esprea	Neumático (Flash)
		Neumático (Flash)	De banda con circula <u>ci</u> ón de gas que atraviesa el lecho.
		Banda (Conduc <u>ci</u> ón)	
		Túnel con Cha <u>ro</u> las	

Existen muchos otros tipos de secadores, que se omiten de bido a que la Fig. I.3, solamente nos sirve, para dar una idea de la situación que guarda el secador de este trabajo, con respecto a la clasificación de acuerdo con la escala de producción, que nos es muy importante para conceptuarlo únicamente, ya que como secador con fines experimentales, resultan más importantes la formación e información, que pueda proporcionar al practicante, que el volúmen de producción que pueda ofrecer, sin menospreciar este parámetro determinante para un correcto diseño.

I. c.- PROCESO DE SELECCION DE UN SECADOR.

Como el diseño y operación de una planta necesita en gran parte del estudio de las operaciones unitarias de la Ingeniería Química, así como consideraciones de criterio en cuanto al diseño mecanico y diseño de accesorios, deberán tomarse en cuenta las dificultades para diseñar un secador, que con el progreso y perfeccionamiento de estos equipos han sido encontradas y recopiladas para servir como guía de diseño.

Las dificultades de diseño y selección más importantes que tienen que ser resueltas sin un orden de prioridad aparente, son: el carecer de secadores estandarizados a nivel laboratorio que indiquen en forma precisa las propiedades del material por secar;

que la mecánica real de cómo se elimina el líquido de la substancia que lo contiene no haya sido determinada con exactitud, hasta la fe cha, y desde el punto de vista de la Ingeniería Química no se ha co nocido con satisfacción, cuántos secadores trabajan con eficiencia admisible y han servido como patrón para diseñar y seleccionar aparatos del mismo tipo, llevando consigo los defectos de los pri meros.

Las siguientes son algunas consideraciones que deben ser bien analizadas para realizar un buen diseño y selección:

Se tienen que realizar experiencias que proporcionen datos de comportamiento del material en diversos secadores y en distin tas condiciones de proceso, tomar en cuenta el deterioro del mate rial por sobre-calentamiento, dificultades en la alimentación del material húmedo, así como sacarlos del mismo.

Los datos del material tomado como base para el diseño del secador de este trabajo, son bibliográficos; en cuanto a la ali mentación y descarga se ven en el Capítulo IV.

Seleccionar adecuadamente los materiales de construcción del interior del secador, ya que puede traer como consecuencia

una reducción de la entrada y la degradación de la sensibilidad al calor que pueda tener el material debido, si es el caso, a la gran cantidad de calor necesario para calentar el depósito.

Acceso al interior del secador, para mantenimiento y Limpieza.

Grado de ensuciamiento del secador, establecimiento de los períodos de limpieza, así como cuando se trate de secar un material diferente.

Condiciones de trabajo, relativas al operador.

Eficiencia térmica, vigilancia y control.

Evitar el mantenimiento excesivo, establecer períodos calculados, para diferentes condiciones de proceso y diversos materiales.

El sobre - diseño del equipo auxiliar

Las dificultades anteriores pueden ser evitadas, si se cuenta con alguna experiencia y se conocen las características del material por secar y además, se cuenta con facilidades para realizar pruebas que permitan conocer el comportamiento del material.

Muchas veces no se cuenta con el tiempo suficiente para

hacer ciertas determinaciones y pruebas, desconociéndose, además, las limitaciones del equipo, no se les da la importancia que merecen a las recomendaciones hechas en los párrafos anteriores, sin embargo, es necesario ser realistas al considerar todo lo anterior ya que la planta de secado es la mayoría de las veces, una pequeña parte del proceso, pequeña, pero esencial.

Como consecuencia, se destinará gran parte de la inversión al diseño del equipo, asimismo, se deberá dejar espacio razonable para ampliaciones futuras.

C A P I T U L O I I

TEORIA DE SECADO

- II.a) Mecanismos de Secado
- II.b) Períodos de Secado
- II.c) Período de velocidad constante
- II.d) Tiempo de secado para el período de velocidad constante.

TEORIA DE SECADO

IIa) Mecanismos de Secado

El secado como cualquier otra operación unitaria, requiere de cálculos fundamentales, los cuales pueden ser abordados desde dos puntos de vista: según el proceso y según el proyecto.

Según el proceso, los cálculos se realizan en función del proceso de transmisión de calor necesario para evaporar el agua, y según el método de eliminar el vapor de agua.

Según el proyecto, se calcula la velocidad de secado o tiempo necesario para efectuarlo y las cantidades de calor y aire necesarias.

A continuación se describen brevemente las bases y teorías generales de la operación unitaria de secado.

En el secado se utiliza la transmisión de calor por convección, conducción, radiación o combinación de cualesquiera de las tres.

La característica que distingue a los secadores, es principalmente, el método de transmisión de calor, aunque en la gran mayoría de ellas, el mecanismo se efectúa calentando primero la superficie del sólido, y de ahí al interior. Así pues, la transferencia de

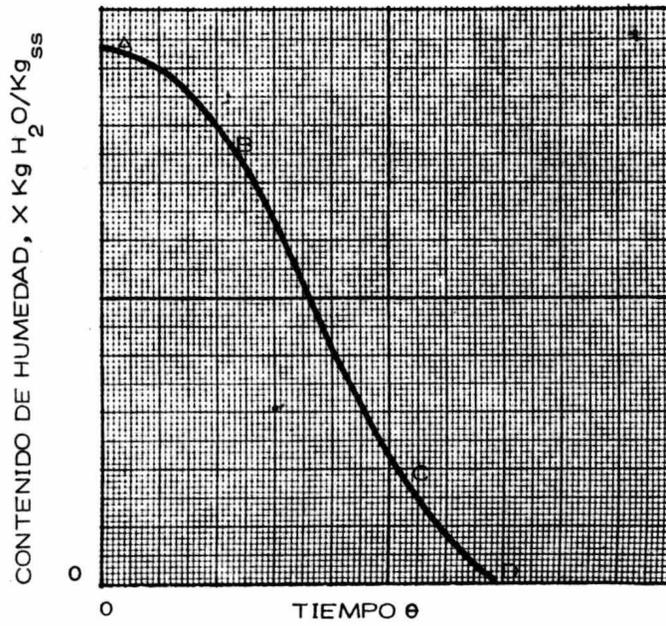
masa se efectúa como líquido o vapor, o como ambos dentro del sólido, y como vapor desde las superficies húmedas.

Podemos distinguir dos mecanismos en el secado, mecanismo interno, la difusión del líquido hacia el exterior mediante gradientes de presión originadas por un incremento en la temperatura; el mecanismo externo comprende, la evaporación del líquido desde la superficie hacia el seno del gas secante, mediante la cesión de calor por parte del aire, hasta obtener el calor latente de evaporación necesaria para evaporar el líquido.

El mecanismo interno de circulación del líquido está determinado fundamentalmente por la estructura del sólido: difusión en sólidos homogéneos contínuos: circulación capilar en sólidos granulares y porosos, circulación debida a gradientes de contracción y presión; circulación causada por la gravedad y circulación originada por una sucesión de evaporaciones y condensaciones.

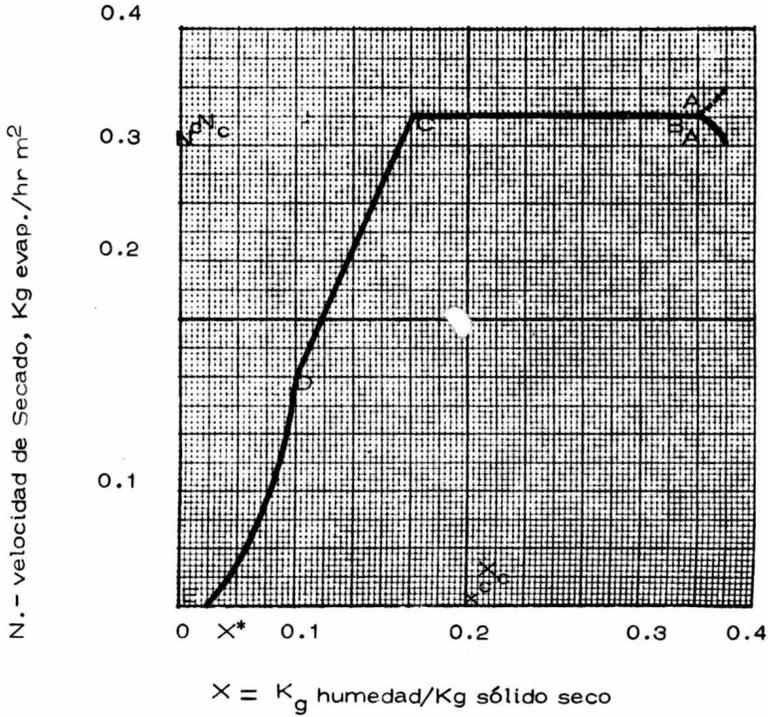
De los mecanismos anteriores, uno es el que generalmente predomina, sin embargo, no se puede precisar si en alguna parte del período de velocidad decreciente, predomina uno o varios de ellos, ésto es lo que ha hecho pensar a los investigadores que no es posible determinar con precisión la trayectoria de la curva de secado en la

FIG. II.1



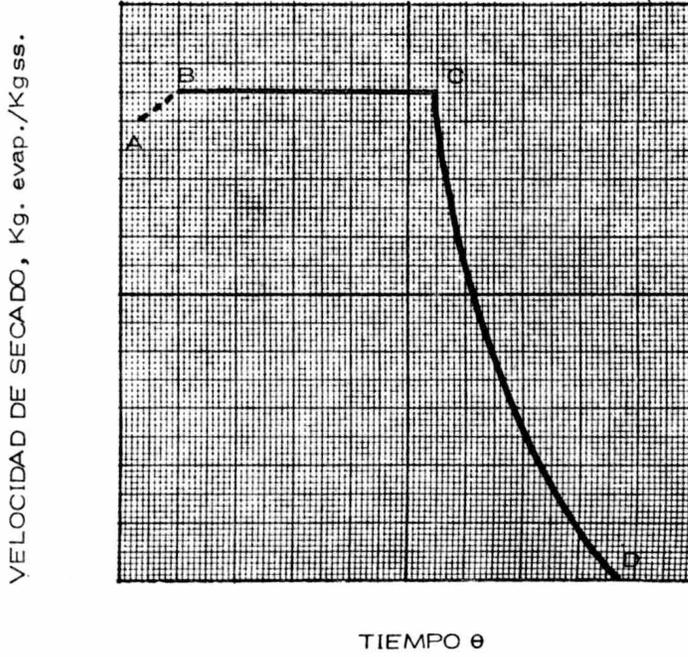
CURVA DE SECADO

FIG. II.2



CURVA DE SECADO

FIG. II.3



etapa final, ya que en la mayoría de las veces se han encontrado desviaciones en la práctica con respecto a la teoría.

De lo anterior se deduce que, deben efectuarse varias pruebas para determinar con la mayor precisión la curva de secado.

Los factores que afectan el mecanismo externo o de evaporación son: temperatura externa, humedad de aire, cantidad de aire, estado de subdivisión y velocidad del aire.

II.b.- Períodos de Secado

Como resultado de pruebas de secado, se obtienen datos, que relacionan el contenido de humedad con el tiempo. La gráfica que se obtiene con estos datos se muestra en la figura II.1, que representa la eliminación de agua sufrida por un sólido en varias etapas, primero la evaporación de la humedad libre, segundo período de evaporación desde una superficie con agua libre en área gradualmente decreciente y finalmente el período en el que se evapora el agua del interior del sólido. Y aunque la curva anterior nos demuestra la variación del contenido de humedad con respecto al tiempo, esta variación la podemos apreciar mejor en sus diferentes etapas, diferenciando la curva, transportando gráficamente la velocidad de secado en función del contenido de humedad como se indica en la figura

II.2, otra forma es transportar gráficamente la velocidad de secado en función del tiempo, como se indica en la figura II.3.

Estas curvas de velocidad de secado, nos demuestran, que la operación no es un proceso contínuo y estable en el cual domine un solo mecanismo. La sección B-C de cada curva representa el período de velocidad constante de secado. La sección de curva C-D representa el período de velocidad decreciente, y como lo representan las gráficas, varía. El punto C, donde termina el período de velocidad constante y empieza el de velocidad decreciente, se llama contenido de humedad crítica.

La sección A-B, representa un período de calentamiento que puede ser importante o nó, según el proceso.

II.c.- Período de velocidad constante.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, en este período, se evapora o elimina el agua libre desde la superficie del sólido.

La intensidad de la evaporación, dependerá exclusivamente de la velocidad de difusión del vapor de agua, através de la película de aire en la superficie del sólido, saliendo de ella y entrando en la masa principal de la corriente de aire, ésta hace que la temperatura

superficial se mantenga más o menos constante, siempre y cuando me
 dios externos no alteren el suministro calorífico al sistema, y será
 muy próxima a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Sin embargo,
 cuando se suministra calor por conducción o radiación a la superficie
 de sólido, la temperatura variará entre la temperatura de entrada del
 aire y la temperatura del bulbo húmedo, ésta será una manera de opti
 mizar el proceso ya que ésto trae como consecuencia, un incremento
 en la velocidad de secado.

Si la evaporación del líquido, se realiza por medio de gases
 calientes en el período de velocidad constante, se establece un equilibr
 brio dinámico entre el flujo de transferencia de calor, y la velocidad
 de evaporación. Este equilibrio se representa por medio de la ecua
 ción siguiente:

$$N = \frac{h_t A \Delta t}{\lambda}$$

N.- Velocidad de evaporación, $K_g H_2 O \text{ evap.}/K_g S.S.$

h_t .- Coeficiente de transferencia de calor, $kcal/hr(m^2)^{\circ}C$

A.- Area de transferencia de calor y evaporación, m^2

$\Delta t = t - t'_s$, t.- Temp. bulbo seco, t'_s .- temp. de la sup. de evaporación
 ambas en $^{\circ}C$.

λ .- Calor latente de evaporación a t'_s , $kcal/kg$

Cuando el coeficiente de transferencia de calor utilizado, es únicamente el de convección, la temperatura de la superficie en las condiciones de equilibrio, es la del bulbo húmedo del aire y p_s es la presión de vapor a esa temperatura. Como el calor transferido por conducción y radiación, es despreciable en comparación al calor transferido por convección, como lo es en el caso del secador de este trabajo, el coeficiente total de transferencia de calor, puede tomarse como el coeficiente de transferencia de calor por convección para fines prácticos de diseño. Sabemos que el calor suministrado por conducción y radiación es despreciable, pero influye en la temperatura superficial, aumentándola arriba de la temperatura de bulbo húmedo. La proporcionalidad, sólo podrá ser definida en la práctica, debido a la infinidad de variables intrínsecas, a cada secador en particular.

Una parte muy importante es el análisis metódico de los tres factores principales que afectan la velocidad constante de secado y que son: los coeficientes de transferencia de calor o materia, la superficie expuesta al gas o medio secante, y la diferencia de temperaturas o humedades del gas secante y la superficie del sólido.

II.c.1.- Efecto de la velocidad del aire.

El efecto se produce sobre los coeficientes de transferencia de materia y calor, ya que los flujos de transferencia de masa y calor en este período dependen principalmente de la difusión del calor y el vapor a través de la película de aire en la superficie del sólido, es por eso que se han determinado dichos coeficientes en función de la masa velocidad.

Para el caso particular que nos atañe, consideraremos una cama de sólidos, de apreciable espesor en comparación al tamaño de las partículas como en la figura II-4. La curva de secado será una representación similar a las de las figuras II-1, II-2, II-3.

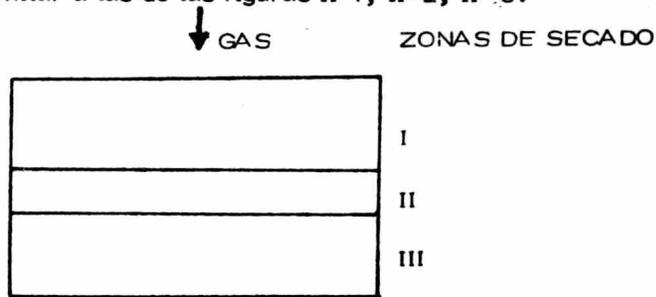


FIG.II.4

La evaporación de la humedad excesiva hacia el gas, ocurre en una zona relativamente estrecha, la cual se mueve lentamente en la misma dirección de circulación del gas y así la cama se va calentando internamente y el gas que abandona la zona, la abandona saturado y a la temperatura de saturación adiabática del gas entrante, esa es

también la temperatura superficial de las partículas húmedas.

El período de velocidad constante de secado, dura tanto como el tiempo necesario para que la primera zona alcance el final de la cama, cuando esto sucede la velocidad de secado comienza a decrecer debido a que el gas no la abandona en condición saturada. En otras palabras, una onda de desorción pasa a través de la cama. Sin embargo, el punto de vista de interés, es el contenido de humedad en el sólido, aún más, de los cambios que ocurren en el gas saliente. En el caso de camas poco profundas compuestas de partículas grandes el gas abandona la cama, sin saturarse desde el principio, pero tanto como la superficie de cada partícula permanezca totalmente húmeda, habrá aún, un período de velocidad constante.

El período de velocidad decreciente empezará cuando la humedad superficial sea completamente agotada.

II.c. PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

(Velocidad de Secado de la humedad superficial)

Consideraremos una cama de sección transversal uniforme, como en la figura II.4, alimentada con un gas de humedad Y , a la velocidad de gas G_s , $\frac{\text{Kg gas seco}}{\text{hr (m}^2 \text{ de sección transversal de cama)}}$, la veloci

dad máxima de secado N_{\max} , ocurrirá si el gas que abandona la cama está saturado a la temperatura de saturación adiabática, con humedad Y_{sa} .

$$N_{\max} = (Y_{sa} - Y_1) - \text{II.c.1}$$

Donde N se expresa como:

$$N = \frac{\text{kg de humedad evaporada}}{\text{hr (m}^2 \text{ de sección transversal de cama)}}$$

En general el gas abandonará la cama con una humedad Y_2 y la velocidad instantánea de secado será:

$$N = G_s (Y_2 - Y_1) - \text{II.c.2}$$

Para una sección diferencial de cama donde el gas sufre un cambio de humedad dY y abandone a una humedad Y , la velocidad de secado está dada por: $dN = G_s dY = Ky dS (Y_{sa} - Y) - \text{II.c.3}$, donde S es la superficie interfacial por metro cuadrado de sección transversal de cama; haciendo que a represente la superficie interfacial por unidad de volumen en cama cuyo espesor sea Z_s ,

$$dS = a dZ_s \text{ ————— II.c.4}$$

La ecuación II.a.3 se convierte en:

$$\int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{Y_{sa} - Y} = \int_0^{Z_s} \frac{k_y a dZ_s}{G_s} \quad \text{II.c.5}$$

integrando la ecuación tenemos:

$$\ln \frac{Y_{sa} - Y_2}{Y_{sa} - Y_1} = N_{tg} \frac{k_y a dZ_s}{G_s} \quad \text{II.c.6}$$

donde N_{tg} son las unidades de transferencia del gas en la cama, esta ecuación es la misma que de la que se hace referencia para calcular la altura de la unidad de transferencia en las operaciones de contacto aire-agua, desarrollada para una situación directora para la evaporación, es así la media logarítmica de $(Y_{sa} - Y_1)$ y $(Y_{sa} - Y_2)$, de acuerdo con las ecuaciones utilizadas para las operaciones de contacto aire-agua. Combinando las ecuaciones II.c.1, II.c.2, y II.c.6, tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_{max}} &= \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{sa} - Y_1} = 1 - \frac{Y_{sa} - Y_2}{Y_{sa} - Y_1} = 1 - e^{-N_{tg}} \\ &= 1 - e^{-k_y a Z_s / G_s} \quad \text{II.c.7} \end{aligned}$$

La ecuación anterior nos proporciona la velocidad de secado N , si los valores de $k_y a$, o de N_{tg} pueden ser determinados. Esos han sido establecidos para casos especiales, de la forma siguiente:

Para partículas grandes (0.3 cm - 2 cm de diámetro) en camas poco profundas (de 1 cm a 6.25 cm de espesor); secado de la humedad ilimitada en partículas porosas y no porosas. Durante el período de velocidad constante de secado, el gas abandona la cama sin saturarse, y a la velocidad constante de secado está dada por la ecuación, II.c.7. Para este propósito en especial k_y está dada por:

$$k_y = j_D \frac{G_s}{S_c}^{2/3} \quad \text{--- II.c.8}$$

El número de Schmidt para aire secando agua de sólidos

$$S_c = 0.6 \text{ y } j_D:$$

Curva	Situación	Operación	X
7	Flujo de gases a través de sólidos empacados	Transferencia de Materia	$Re'' j_D (10^{-1}) = \frac{k_y (S_c)^{2/3}}{G} (10^{-1})$
8	Flujo de gases a través de sólidos empacados.	Transferencia de Materia	$Re' j_H (10^{-1}) = \frac{h}{C_p G} (Pr)^{2/3} (10^{-1})$

$$S_c^{2/3} = 0.6^{2/3} = 0.711395; \quad Re'' = \frac{D_p G_s}{\mu}$$

Durante el período de velocidad decreciente, la resistencia interna de la humedad al movimiento puede ser importante y no se disponen de datos generalizados, por lo que cada operación debe ser tratada en particular. En muchos casos se ha encontrado que gráficas semilogarítmicas de la forma de la figura II.5 son útiles. Si la línea de esta gráfica es recta se aplican las ecuaciones siguientes:

N es lineal en X

$$N = mX + b$$

donde m es la pendiente de la porción lineal de la curva y b es una constante.

$$\theta = \frac{L_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{mX + b} = \frac{L_s}{mA} \ln \frac{mX_1 + b}{mX_2 + b} \quad \text{II.c.9}$$

pero como:

$$N_1 = mX_1 + b, \quad N_2 = mX_2 + b \quad \text{y}$$

$$m = \frac{N_1 - N_2}{X_1 - X_2}$$

La ecuación II.c.9 se convierte a:

$$\theta = \frac{L_s(X_1 - X_2)}{A(N_1 - N_2)} \quad \ln \frac{N_1}{N_2} = \frac{L_s}{A} \frac{(X_1 - X_2)}{Nm}$$

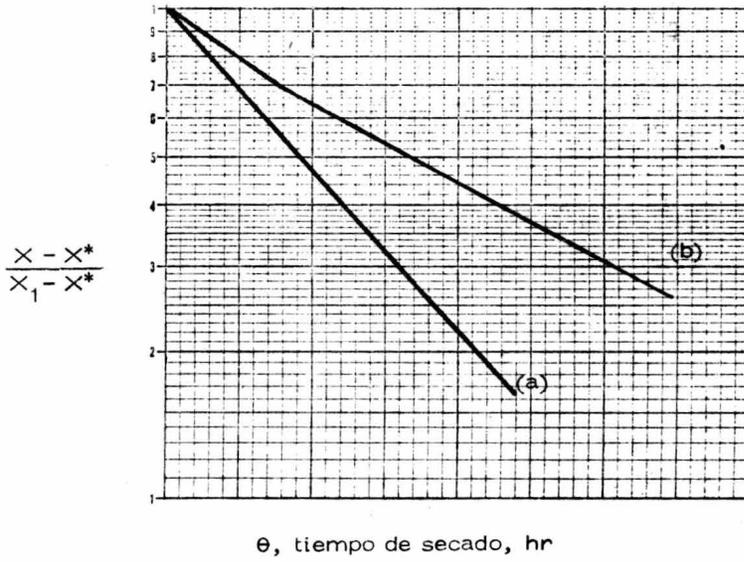


Fig. II.5

donde N_m es el promedio logarítmico de la velocidad N_1 , al contenido de humedad X_1 y N_2 a X_2 .

Frecuentemente la curva de velocidad decreciente por entera, puede ser tomada como una línea recta, entre los puntos C y E. Esto se debe a que algunas veces se carece de datos detallados. En ese caso:

$$N = m(X - X^*) = \frac{N_c(X - X^*)}{X_c - X^*} \quad \text{II.c.10}$$

y,

$$\theta_d = \frac{L_s(X_c - X^*)}{N_c A} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad \text{II.c.11}$$

Como $X_1 = X_c$, debido a que es la iniciación del período de velocidad decreciente y X_2 es la humedad en cualquier punto de la curva, mayor de X^* se puede tomar $X_2 = X$ por lo que:

$$\theta_d = \frac{L_s(X_c - X^*)}{N_c A} \ln \frac{X_c - X^*}{X - X^*} \quad \text{II.c.12}$$

El secado de la humedad límite en cuanto a tiempo y velocidad, puede considerarse como ya se dijo, dentro de las ecuaciones anteriores aunque algunos autores (T r e y b a l) opinan que se pueden hacer algunas adaptaciones a los métodos usados para absorción en camas fijas, sin embargo, no se dispone de ninguna confirmación experimental.

II.d.- Tiempo de secado del Período de Velocidad Constante.

La velocidad de secado es por definición:

$$N = \frac{-Ls}{A} \frac{dX}{d\theta} \quad \text{II.d-1}$$

rearrreglando e integrando dentro de un intervalo de tiempo dentro del cual el contenido de humedad varía de su valor inicial X_1 , a su final valor X_2 , tenemos:

$$\theta = \int_0^{\theta} d\theta = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{N} \quad \text{II.d-2}$$

Para el período de velocidad constante, si el secado toma lugar enteramente dentro de este período, así que X_1 y X_2 sean mayores que X_c y $N = N_c$, la ecuación b.2 se convierte en:

$$\theta = \frac{Ls(X_1 - X_2)}{A N_c} \quad \text{II.d-3}$$

y como:

$$N_c = N \max (1 - e^{-j_D aZ_s / 0.711395}) \quad \text{II.d.4}$$

$$\theta_c = \frac{Ls(X_1 - X_c)}{A N_{\max} (1 - e^{-j_D aZ_s / 0.711395})} \quad \text{II.d.5}$$

si hacemos $X_2 = X_c$, lo que quiere decir que estamos tomando el período comprendido entre el contenido inicial de humedad y el crítico, parámetros que determinan el período de velocidad constante y nos proporcionan el tiempo para dicho período que es:

$$\theta_c = \frac{L_s (X_1 - X_c)}{AN_{\max} (1 - e^{-j_D a Z_s / 0.711395})} \quad \text{II.d.6}$$

El tiempo total nos lo da la suma de los dos tiempos anteriores:

$$\theta_T = \theta_c + \theta_d = \frac{L_s (X_1 - X_c)}{AN_{\max} (1 - e^{-j_D a Z_s / 0.711395})} + \frac{L_s (X_c - X^*)}{AN_{\max} (1 - e^{-j_D a Z_s / 0.711395})} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad \text{II.d-7}$$

sustituyendo la ecuación 6.12, tenemos:

$$\theta_T = K (X_1 - X_c) + (X_c - X^*) \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad \text{II.d-8}$$

$$K = \frac{L_s}{AN_{\max} (1 - e^{-j_D a Z_s / 0.711395})}$$

sustituyendo la ecuación 6.12, tenemos:

$$\theta = K (X_1 - X_c) + (X_c - X^*) \ln \frac{X_c - X^*}{X - X^*}$$

(j_D se obtiene de la gráfica 3.11. Treybal.)

Las ecuaciones anteriores son aplicables para el secado de sólidos con contenidos de humedad bajos, y cuando el líquido por extraer se encuentre en exceso se considera que el aire arrastra al exceso mediante un fenómeno mecánico; todas estas consideraciones son

esencialmente importantes para un adecuado diseño en particular.

Se han tomado como base para el diseño del secador motivo de este trabajo, las experiencias obtenidas por varios investigadores y que se encuentran como fundamento para establecer las teorías de secado citadas en la bibliografía.

Cuando se trate de líquido contenido en exceso las ecuaciones para los períodos de velocidad de secado y tiempo del mismo - pueden ser las siguientes, siempre y cuando se realicen los ajustes necesarios a cada caso en particular:

Velocidad de Secado constante

$$\frac{dX}{dO} = N = \frac{0.44 C_s a G^{0.59} \Delta t_m}{\rho_s D_p^{0.41}}$$

$$\text{Integrando de } X_o \text{ a } X_c: \theta_c = \frac{2.3 \rho_s \lambda D_p^{0.41}}{C_s a G^{0.59} \Delta t_m} (X_o - X_c)$$

$$\text{Velocidad decreciente: } N_d = N_c \frac{X - X^*}{X_c - X^*}$$

$$\text{Integrando } \theta_d = \frac{2.3 \rho_s \lambda D_p^{0.41} (X_c - X^*)}{C_s a G^{0.59} \Delta t_m} \ln \frac{X_c - X^*}{X - X^*}$$

como $\theta_r = \theta_c + \theta_d$, tenemos:

$$\theta_r = \frac{2.3 \rho_s \lambda D_p^{0.41} (X_c - X^*)}{C_s a G^{0.59} \Delta t_m} \left(\frac{X_o - X_c}{X_c - X^*} + \ln \frac{X_c - X^*}{X - X^*} \right)$$

CAPITULO III

BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

- III.a) Criterios de Diseño.
- III.b) Ecuaciones para el Balance de Ma
teria y Energía.
- III.c) Sustitución de valores en las ecuacio
nes de balance.

CAPITULO III

III.a) Criterios de Diseño.

Nuestro criterio de selección queda restringido por las necesidades del Laboratorio por el espacio, suministro de energía, facilidad de manejo y obtención de datos lo más aproximados posibles al comportamiento físico-químico de diversos materiales en diversas condiciones.

En primer término, al definir la función experimental del aparato, fijaremos escalas de trabajo para las cuatro más importantes variables del proceso que son:

III.a.1) Temperatura del Aire.

III.a.2) Cantidad de Aire.

III.a.3) Velocidad de la Banda.

III.a.4) Cantidad de Vapor de 6 Kg/cm^2

III.a.1) Temperatura del Aire.- Hasta 90°C , ya que un gran número de productos pueden ser secados abajo de esa temperatura.

III.a.2) Cantidad de Aire.- Hasta 1000 Kg/hr , tratase

de una cantidad excesiva pero que puede ser manejada por un ventilador de aproximadamente un HP, como se verá más adelante.

III.a.3) Velocidad de la Banda.- Con un motor de velocidad variable se ajustará la misma a las necesidades del proceso.

III.a.4) La cantidad de vapor se calculará para que, con un número determinado de tubos se obtenga un intercambio de calor que proporcione al aire la temperatura deseada.

Ahora, según necesidades del Laboratorio queda indicado con la finalidad de este trabajo, es decir un secador en forma de túnel, con una banda transportadora perforada en la cual el aire la atraviesa perpendicularmente.

El espacio disponible es de ocho metros de largo por dos de ancho por lo que según autores, las mejores dimensiones de la banda serán de: largo 6.50 m. y ancho 0.60 m. para cada sección, constando de cuatro secciones, más 0.50 m. para espacio de carga y descarga, la altura del gabinete será de 1.20m.

III.b) Ecuaciones para el Balance de Materia y Energía.

Como ejemplo práctico para el diseño hemos escogido los da

tos prácticos para el secado del Gel de Sílice, extraídos de la Bibliografía I, que serán expuestos al aplicarlos a las ecuaciones de los balances.

De acuerdo con el medio de transmisión de calor, los procesos pueden ser:

III.b.1.- A d i a b á t i c o .- Cuando todo el calor cedido al material se efectúa únicamente por medio del aire.

III.b.2.- I s o t é r m i c o.- Cuando parte del calor cedido al material por secar, se proporciona por medio del aire y parte lo cede el mismo secador.

III.b.3.- Cuando no existe transmisión de calor por aire y el material se calienta directamente.

En la mayoría de los casos de secado se utiliza el primer principio: Proceso Adiabático, mismo que se aplica en este trabajo y que se ilustra en la figura III.1

III.b.4.- Nomenclatura

t	Temperatura del aire, °C
T	Temperatura del sólido, °C
Y	Contenido de humedad del aire, KgH ₂ O/kg aire seco.
X	Contenido de humedad del sólido, KgH ₂ O/kg de sólido seco.
Q	Cantidad de calor, Kcal/hr.
G	Cantidad de aire Kg/hr, m ³ /hr.
m	Masa del sólido, Kg/hr.
η	Eficiencia del proceso
q	Cantidad de calor, Kcal/hr.
C _{p_s}	Calor específico del sólido $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$
C _{p_A}	Calor específico del aire $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$
C _{p_v}	Calor específico del vapor $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$
C _{p_{H₂O}}	$\frac{1 \text{ Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$
V _H	Volúmen húmedo del aire $\frac{\text{M}^3}{\text{Kg}}$

III.b.5.- Cálculo del gasto de aire.

$$m(X_0 - X_1) = G(Y_1 - Y_0) \text{ ----- III.b.5.1}$$

$$G = \frac{m(X_0 - X_1)}{(Y_1 - Y_0)} \text{ ----- III.b.5.2}$$

Ahora solamente se planteará esta ecuación, aunque se pue de suponer que la incógnita es la humedad del aire a la salida y que se rá un poco menor a la humedad de saturación Adiabática del aire a las condiciones dadas.

III.b.6.- Cálculo del calor necesario para secar el material.

De acuerdo a la figura III.1

$Q_T =$ Cantidad de calor transferido al aire en el calenta dor.

$Q_M =$ Cantidad de calor que cede el aire para secar el material.

$Q_A =$ Calor desperdiciado, que sale con el aire, por lo tanto

$$Q_T = Q_M + Q_A \text{ -----III.b.6.1}$$

y así la eficiencia será la relación entre el calor realmente cedido al material para secarlo y el calor transferido al sistema:

$$\eta = \frac{Q_M}{Q_T} \text{ ----- III.b.6.2}$$

Según la figura III.1, la ecuación que representa la cantidad de calor cedido al aire en el calentador es:

$$Q_T = G_o C_{pA} (t_1 - t_o) \text{----- III.b.6.3}$$

Y el calor desperdiciado, o sea el que abandona el secador con el aire es Q_A :

$$Q_A = G_o C_{pA} (t_2 - t_o) \text{----- III.b.6.4}$$

El calor transferido para secar el material Q_M :

$$Q_M = G_o C_{pA} (t_2 - t_1) \text{----- III.b.6.5}$$

Y de acuerdo con (III.b.6.1), tenemos:

$$G_o C_{pA} (t_1 - t_o) = G_o C_{pA} (t_2 - t_o) + C_{pA} (t_2 - t_1) G_o \text{----- III.b.6.6}$$

El calor que el aire cede en el secador se compone de la su ma de los siguientes calores:

q_1 = Calor necesario para calentar el material desde la temperatura inicial, hasta la temperatura de evapora ción del líquido.

$$q_1 = m C_{p_s} (T_1 - T_o) \text{----- III.b.6.7}$$

q_2 = Calor necesario para calentar agua residual desde la temperatura inicial hasta la temperatura de evapora ción.

$$q_2 = M_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_1 - T_0) \text{----- III.b.6.8}$$

Y como $M_{H_2O} = mX$

$$q_2 = mX_1 (T_1 - T_0) \text{----- III.b.6.9}$$

q_3 = Calor necesario para evaporar el agua, desde la temperatura inicial hasta la temperatura de salida del vapor.

$$q_3 = m(X_0 - X_1) \cdot \left(C_{p_{H_2O}} (T_{eb} - T_0) + \lambda_{T_{eb}} + 0.46 (t_2 - T_{eb}) \right) \text{----- III.b.6.10}$$

$$C_{p_{vapH_2O}} = 0.46$$

Haremos mención de otros calores que, aunque por pequeños se desprecian:

q_4 = Calor necesario para calentar el equipo

q_5 = Calor perdido por radiación

De todo análisis se tiene:

$$Q_M = q_1 + q_2 + q_3 \text{----- III.6.11}$$

Por lo tanto:

$$Q_M = mC_{p_s} (T_1 - T_0) + mX_1 C_{p_{H_2O}} (T_1 - T_0) + m(X_0 - X_1) \left[C_{p_{H_2O}} (T_{eb} - T_0) + \lambda_{T_{eb}} + 0.46 (t_2 - T_{eb}) \right] \text{--- III.b.6.12}$$

$$Q_M = G_0 C_{p_A} (t_2 - t_1) = m(C_{p_s} + X_1) (T_1 - T_0) + m(X_0 - X_1) \left[(T_{eb} - T_0) + \lambda_{T_{eb}} + 0.46 (t_2 - T_{eb}) \right] \text{----- III.b.6.13}$$

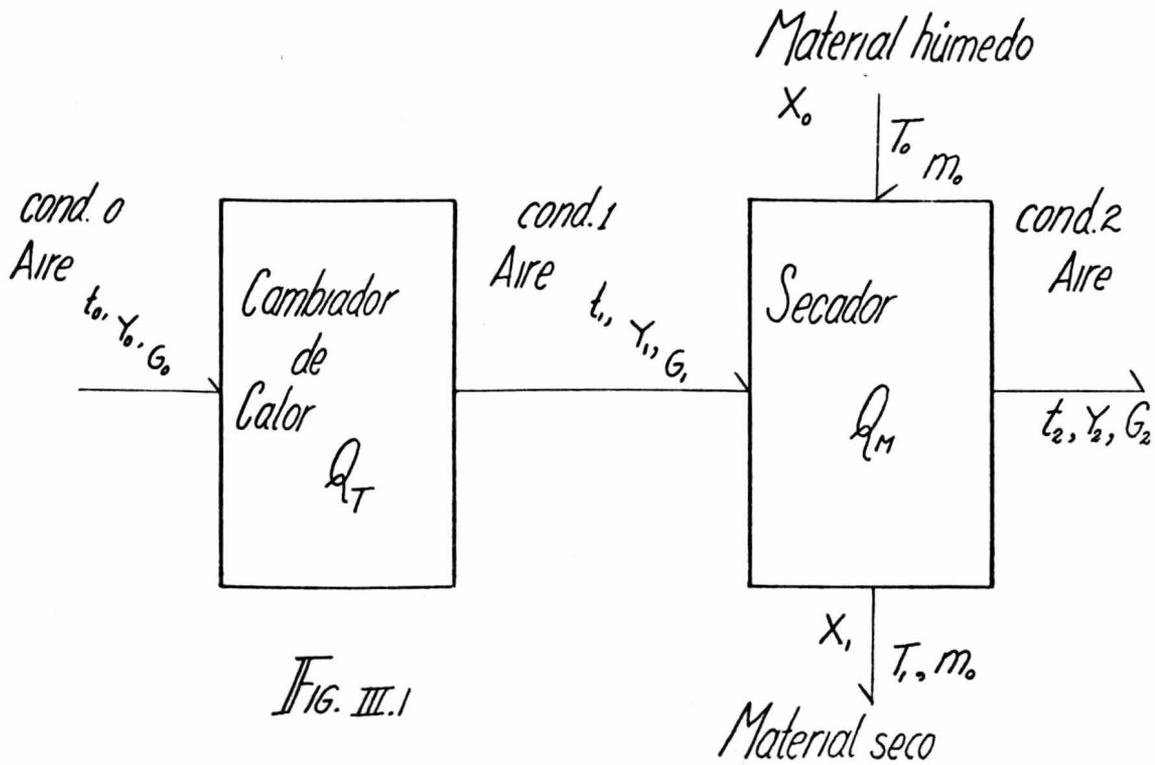


FIG. III.1

De la ecuación anterior se pueden obtener los valores de Q y G_o , ya que T_{eb} y $\lambda_{T_{eb}}$ se obtienen bajo la suposición teórica que dice que la temperatura de equilibrio de la superficie de evaporación del sólido, T_s , es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire t_w y también igual a T_{eb} , ya obtenido se saca $\lambda_{T_{eb}}$ de una carta de humedad.

$$T_{eb} \left| \begin{array}{l} t_1 \\ \Rightarrow \lambda_{T_{eb}} \Rightarrow Y_{T_{wb}} \\ Y_1 \end{array} \right.$$

La humedad de salida del aire Y_1 tiene que chequear con la que se obtiene en la ecuación III.b.7.1

Con todos los valores anteriores substituidos en la ecuación III.b.6.13, se obtiene Q_M y después se calcula G_o , o sea el gasto de aire por medio de III.b.6.5

$$G_o = \frac{Q_M}{C_{pA} (t_2 - t_1)} \quad \text{----- III.b.6.14}$$

Con el volúmen húmedo obtenemos el volúmen de aire necesario.

$$V_H \left| \begin{array}{l} Y_1 \\ \Rightarrow \frac{m^3}{Kg} ; G_o \times V_H = \frac{m^3}{hr} \\ t_o \end{array} \right. \quad \text{--- III.b.6.15}$$

III.b.7).- Cálculo de la humedad final del aire:

De acuerdo con III.b.5.2, despejando se obtiene:

$$Y_1 = \frac{m(X_0 - X_1) + G_0 Y_0}{G_0} \text{----- III.b.7.1}$$

III.b.8).- Cálculo del calor desperdiciado, calor con el cual sale el aire:

$$Q_A = G_0 C_{pA} (t_2 - t_0) \text{-----III.b.8.1}$$

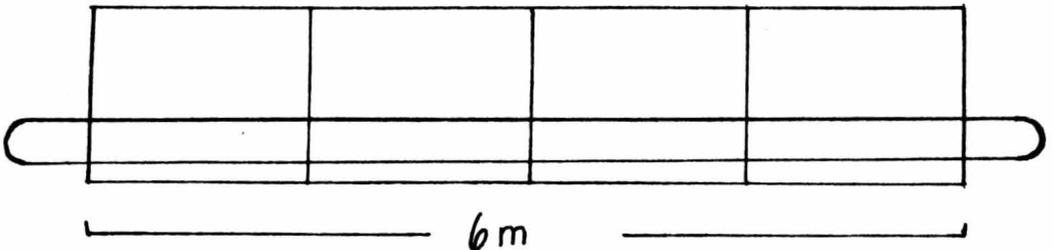
III.b.9).- Cálculo del calor total Q_T .

De acuerdo al proceso este es el calor cedido al aire en el calentador y es la suma del calor aprovechado más el calor desperdiciado.

$$Q_T = Q_M + Q_A \text{----- III.b.9.1}$$

III.c Base de Cálculo: 6.066 de producto seco/hr.

III.c.



Base. 6.066 Proe. seco/hr

$\theta = 120 \text{ min} = 2 \text{ hr}$ ya que la experiencia de algunos investigadores recomiendan un porcentaje mayor del tiempo experimental de terminado.

Velocidad de la banda: 3m/hr

Carga 3.37 Kg/m²

Superficie de la banda $L \times A = 6 \times 0.6 \text{ (m}^2\text{)} = 3.6 \text{ m}^2$

Producción

$$\frac{3.6 \text{ m}^2}{2 \text{ hr}} \times \frac{3.37 \text{ Kg}}{\text{m}^2} = \frac{12.132 \text{ Kg}}{2 \text{ hr}} = 6.066 \frac{\text{Kg ss}}{\text{hr}} \quad \text{III.C.1}$$

Velocidad de evaporación

$$6.066 \frac{\text{Kg ss}}{\text{hr}} (4.49 - 0.215) \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg ss}} = 25.9321 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{hr}}$$

----- III.C.2

Se determinó que el espacio disponible en el Laboratorio era de 8 m de largo por dos de ancho, respecto al primero son 6m de túnel y 0.5 metros para carga y 0.5 m para descarga quedando medio metro de cada lado para maniobras y colocación. Con respecto al segundo, el ancho de la banda será de 60cm. y el ancho total del túnel será de 0.75 m. aproximadamente, dejando de cada lado 0.05 m. para maniobras y mantenimiento. El ancho de la banda es el mínimo reco

mendado en la bibliografía, ya que este equipo es experimental y solamente servirá de guía para estudiar el comportamiento de diversos materiales.

Cálculos.

$$T_1 = 65^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 65^\circ\text{C}$$

$$T_{eb} = 30.5^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 32^\circ\text{C}$$

$$C_{p_s} = 0.22 \text{ Kcal/Kg}_{ss}^\circ\text{C}$$

$$Y_1 = 0.007 \text{ Kg H}_2\text{O/kg aire seco.}$$

$$X_o = 4.49 \text{ Kg H}_2\text{O/kg}_{ss}$$

$$Y_2 = 0.021 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire seco.}$$

$$X_1 = 0.215 \text{ Kg H}_2\text{O/kg}_{ss}$$

$$m = 6.066 \text{ Kg}_{ss}/\text{hr}$$

$$\lambda_{T_{eb}} = 575 \text{ Kcal/kg}$$

Sustituyendo en III.b.6.13

$$Q_M = 6.066(0.22 + 0.215)(65 - 15.8) + 6.066(4.49 - 0.215)[(30.5 - 15.8) + 575 + 0.46(32 - 30.5)]$$

$$Q_M = 15426.9$$

$$Q_M = 15427 \text{ ----- III.C.3}$$

Sustituyendo en III.b.6.14

$$G_o = \frac{15427}{0.255(65-32)} ; G_o = 1834 \text{ Kg aire/hr ----- III.C.4}$$

(p_{aire})

Sustituyendo en III.b.7.1

$$Y_2 = \frac{25.932 \pm 1834 (0.007)}{1834} ; Y_2 = 0.021 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire}$$

De lo anterior

$$V_H \left| \begin{array}{l} t = 15.8^\circ\text{C} \\ Y = 0.007 \end{array} \right. = 0.87 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$0.87 \text{ m}^3/\text{Kg} \times 1834 \text{ Kg/hr} = 1595.58 \text{ m}^3/\text{hr} = 26593 \text{ l/min} \text{ --- III.C.6}$$

Volumen de aire exterior tomado

Complementando el balance de Energía

$$Q_A = 1834 \text{ Kg aire/hr} (0.255 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}) (32 - 15.8)$$

$$Q_A = 7576.25 \text{ Kcal/hr}$$

$$Q_A = 7577 \text{ Kcal/hr} \text{ ----- III.C.7}$$

Cálculo del calor total, sustituyendo en III.b.9.1

$$Q_T = 15427 \pm 7577 = 23004 \text{ Kcal/hr} \text{ ----- III.C.8}$$

La eficiencia de la operación será

$$\eta = \frac{Q_M}{Q_r} = \frac{15427}{23004} = 0.67 \text{ ----- III.C.9}$$

$$\eta = 67\%$$

La escala aceptable según la bibliografía está entre 60 y 70%

CAPITULO IV

- IV.1) Descripción del Equipo
- IV.2) Cálculo del cambiador de calor
- IV.3) Cálculo del Ventilador
- IV.4) Selección del Equipo Auxiliar

IV.1) Descripción del Equipo

IV.1.1).- Gabinete.- El tunel es un gabinete que cuenta con cuatro secciones, cada una con las siguientes dimensiones: 1.20 m de alto, 1.50 m de largo y 0.75 m de ancho, esto incluyendo el espesor de la pared, fig. IV.1, ésta nos indica que un costado está cerrado, mientras el otro tiene una salida para el aire húmedo, el costado consta de dos paneles, uno de 0.90 m por 1.50 m y otro de 0.30 m por 1.50 m, la abertura es de 0.10 m x 1.50 m, asimismo este lado tiene una ventana de 0.1 m por 0.10 m para poder tomar muestras de cada sección y comprobar el avance de la operación.

La parte superior del gabinete llevará el ventilador sostenido por dos ángulos transversales y la distribución y dimensiones se harán como lo muestra la fig. IV.2

La figura IV.3) muestra el costado de salida del aire y el aislante.

Los paneles se atornillarán al bastidor hecho con ángulo de fierro soldado, en los costados llevará soleras, las uniones se sellarán con neopreno. Para la fabricación

del bastidor se recomienda usar ángulo de 2.54 cm y solera de la misma dimensión. El calibre de la lámina galvanizada es de 20 S.A.E. A.S.T.M. A-366B.26

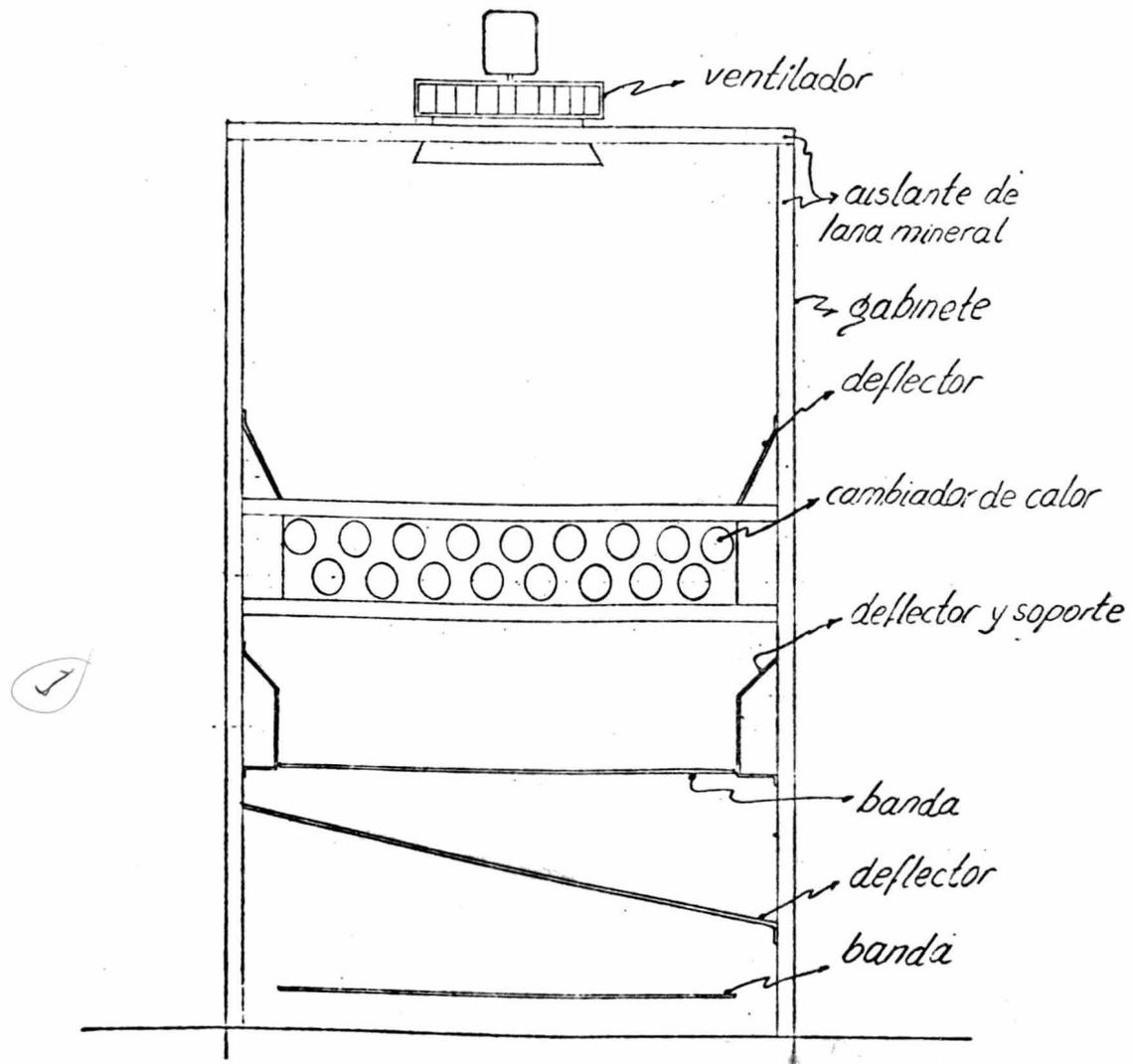
Para mayor duración del equipo se recomienda aplicar película de pintura anticorrosiva a base de aluminio.

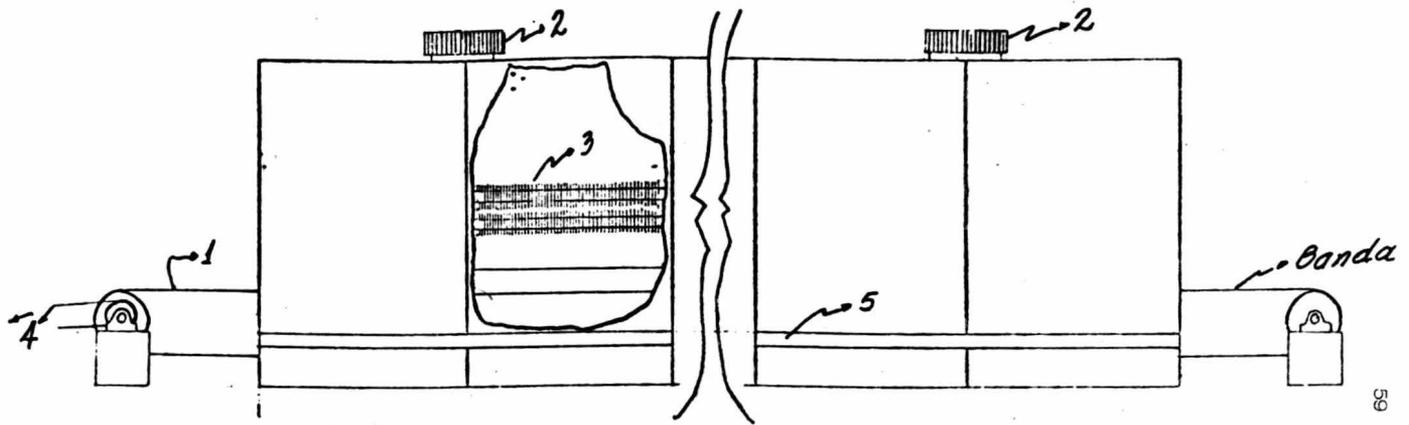
V.1.2).- Banda.

Se eligió una banda con cuenta de malla que permitiera soportar esferas de 3mm de diámetro, y del cual la codificación del fabricante especializada es B485218; el material con el cual se fabrica la banda metálica es alambre galvanizado de 1.20 mm de diámetro; a la banda se le soldarán tablillas de 0.10 m de alto que a su vez también irán soldadas a tensores con un espaciamiento de 0.50 m como lo muestra la figura IV.4.

La banda se moverá por medio de un motor que impulsa un cilindro recubierto con hule; el cilindro tiene un diámetro de 20 cm, y que es el doblez mínimo que permite la banda.

La banda se encontrará tensa en todo el trayecto. La fig. IV.5 nos muestra la disposición de banda, rodamientos, ci





1- Banda , 2- Ventilador 3- Cambrador de Calor

4- Banda al motor 5- Salida de aire



lindros de tracción, y motor. El material de los cilindros es acero al carbón.

Entre la banda, y soldado al gabinete, irá un deflector para la salida del aire también mostrado en la figura IV.6 que es un corte transversal.

IV.2).- Diseño del Cambiador de Calor.

Se diseña de acuerdo con gráficas y datos empíricos de la Bibliografía VII.1 y VII.4

Teniendo en cuenta la eficiencia para secar diferentes materiales, se considera que un gasto razonable de aire por cada sección es de $1000 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$, con una temperatura máxima de 90°C , pudiéndose variar según sea necesario, la elección de la temperatura máxima se llevó a cabo considerando en primer lugar la eficiencia del cambiador de calor con la temperatura que proporciona el vapor a 6 Kg/cm^2 de presión que es de 159°C , además a temperaturas mayores de 90°C algunos materiales orgánicos suelen degradarse.

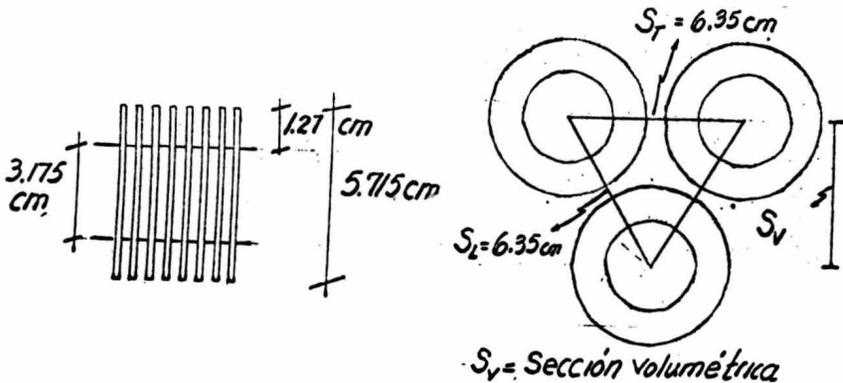
Para el diseño se dispone de tubo aletado de 3.175 cm ($1\frac{1}{4}$ pulg) de diámetro, cédula 40, con 4 aletas por cada 2.54 cm , de

1.27 cm de alto y 0.089 cm de espesor, de acero al carbón.

Se determina como longitud máxima la longitud de una sección 1.5 m, el ancho para colocar los tubos será el mismo que la banda 0.6 m.

El arreglo será triangular, con un espaciamiento entre tubos de 6.35 cm, usando factores de ensuciamiento de 0.003 en ambas corrientes.

El problema se concentra en la determinación del número de tubos por banco, número de bancos, cantidad de vapor y caída de presión a través de los tubos.



IV.2.1).- Balance de Calor

$$Q = m C_p \Delta t; m = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}; C_p = 0.25 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \quad t_1 = 15.8^\circ\text{C}$$

$$Q = 1000 \text{ Kg/hr} \times 0.25 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (90 - 15.8)^\circ\text{C} \quad t_2 = 90^\circ\text{C}$$

$$Q = 18550 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

Cantidad de vapor:

$$Q = m_v \lambda; m_v = \frac{Q}{\lambda}$$

$$Q = 18550 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$\lambda = 895 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

$$m_v = 37.25 \frac{\text{Kg vapor}}{\text{hr}}$$

IV.2.2).

(T) Fluido Caliente		(t) Fluido Frío	
159°C	Temp. Alta	90°C	69°C
159°C	Temp. Baja	15.8°C	143.2°C
0	Diferencia	74.2	74.2

$$MLDT = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2.3 \log \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{74.2}{2.3 \log \frac{143.2}{69}} = \frac{74.2}{0.727} = 102.06^\circ\text{C}$$

$$MLDT = 102.1^\circ\text{C}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = 0 ; S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{74.2}{143.2} = 0.518$$

$$R = 0 ; S = 0.518$$

$$F_T = 1.0$$

$$\Delta t = F_T \times MLDT = 1 \times 102.1^\circ\text{C} = 102.1^\circ\text{C}$$

IV.2.3). Temperaturas Calóricas

$$T_c = 159 \text{ } ^\circ\text{C} ; t_c = 52.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

IV.2.4).- Cálculo del diámetro equivalente y área de flujo.

$$D_e = \frac{2 (\text{Área de tubo desnudo} + \text{área de la aleta})}{\pi (\text{Proyección del perímetro})}$$

IV.2.4.1) Área de la Aleta = A_f

$$A_f = \frac{\pi}{4} (DE)^2 \times 2 \times N^{\circ} \text{ Aletas por metro} \times L$$

$$= \frac{\pi}{4} (5.71^2 - 3.17^2) \times 2 \times 4 \times 39.3 \times 1$$

$$= 0.7854 (22.55) \times 8 \times 39.3 = 0.557 \text{ m}^2/\text{m tubo}$$

$A_f = 0.557 \frac{\text{m}^2}{\text{m tubo}}$
--

IV.2.4.2) Área del tubo desnudo = A_o

$$A_o = 2 \pi r l \times 2 \pi r N^{\circ} \text{ de aletas por metro} \times e \times l$$

$$2r = 0.03175 \text{ m} ; N^{\circ} \text{ de aletas por metro} = 4 \times 39.3$$

$$L = 1 \text{ m} \quad ; e = \text{espesor} = 20 \text{ BWG} = 0.00089 \text{ m}$$

$$A_o = \frac{2 (0.03175)^2 \times 3.1416 \times 1 - 3.1416 \times 0.03175 \times 0.00089 \times 4 \times 39.3 \times 1}{2}$$

$$A_o = (0.09954 - 0.0139) \frac{m^2}{m} = 0.08564 \frac{m^2}{m}$$

$$A_o = 0.08564 \frac{m^2}{m}$$

IV.2.4.3).- Area total = A = A_f + A_o

$$A_t = 0.557 \frac{m^2}{m \text{ tubo}} + 0.08564 \frac{m^2}{m \text{ tubo}} = 0.64264 \frac{m^2}{m \text{ tubo}}$$

$$A_t = 0.643 \frac{m^2}{m \text{ tubo}}$$

IV.2.4.4).- Proyección total del perímetro.

$$= 2 \times h_A \times 2 \times N^o \text{ aletas por metro} + 2 (L - N^o \text{ de aletas} \times \text{espesor}).$$

$$= 2 \times \frac{1.27}{100} \times 2 \times 4 \times 39.3 + 2 (1 - 4 \times 39.3 \times \frac{0.089}{100}).$$

$$= 7.985 \frac{m}{m \text{ tubo}} + 2 \frac{m}{m \text{ tubo}} - 0.2798 \frac{m}{m \text{ tubo}} = (7.985 + 1.72) = 9.705 \frac{m}{m \text{ tubo}}.$$

Diámetro Equivalente

$$D_e = \frac{2(0.64264) \frac{m^2}{m \text{ tubo}}}{\pi (9.705) \frac{m}{m \text{ tubo}}} = \frac{1.28528}{30.489} = 0.0422 \text{ m}$$

$$D_e = 0.0422 \text{ m}$$

IV.2.5).- Número de tubos por banco.

El largo de los tubos será de 1.5 m y se dispone de una anchura 0.6 m (ancho de la banda).

$$\begin{aligned} N^{\circ} \text{ de tubos colocados en banco} &= \frac{\text{Ancho}}{S_T} \\ &= \frac{0.60}{0.0635} = 9.4 \end{aligned}$$

$$N^{\circ} \text{ de tubos} = 9$$

N° de tubos colocados en forma alterna = 8

IV.2.5.1).- Area de flujo, a_A

$$\begin{aligned} &= 1.5 \times 0.6 - 9 \times \frac{3.175}{100} \times 1.5 - 9 \left(2 \times \frac{0.089}{100} \times \frac{1.27}{100} \times 4 \times \right. \\ &\quad \left. 39.3 \times 1.5 \right) \\ &= 0.9 - 0.428 - 0.0479 = 0.9 - 0.4759616 = 0.42404 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Area de flujo} = 0.424 \text{ m}^2$$

FLUIDO CALIENTE: VAPOR : LADO: TUBOS

IV .2.6).- Area de flujo del tubo a'_t , de la tabla 11 del Kern

$$a'_t = 1.5 \text{ pulg}^2 \times (2.54)^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{pulg}^2} = 9.68 \text{ cm}^2$$

$$a'_t = 0.000968 \text{ m}^2$$

Suponiendo que cada banco lleva la totalidad del vapor

$$a_t = \frac{N_t a'_t}{n}$$

donde

N_t = Número de tubos

a_t = Area de flujo transversal total

n = Número de pasos

a'_t Area de flujo transversal de un tubo

$$a_t = \frac{9 \times 0.000968}{1} = 0.008709 \text{ m}^2$$

$$\text{IV.2.6.1).- } G_s = \frac{mv}{a_t} = \frac{37.25 \text{ Kg/hr}}{0.008709 \text{ m}^2} = 4277.2 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}^2}$$

$$G_s = 4277 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}^2}$$

IV.2.7).- De la figura 15 del Kern para el vapor de agua a 159°C.

$$\mu_s = 0.0145 \times 2.42 \times 1.49$$

$$\mu_s = 0.05222 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}}$$

IV.2.8).- Para la variación de presión únicamente.

De la tabla 11 del Kern

$$D = 0.0351 \text{ m}$$

$$R_{et} = \frac{4277 \times 0.0351}{0.0522} = 2876$$

$$R_{et} = 2876$$

IV.2.9).- Según Kern para el vapor

$$h_{i0} = h_o = h_i = 1500 \frac{\text{Btu}}{\text{hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$1500 \times 4.88 = 7310 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

El factor de ensuciamiento $R_{di} = 0.003$

$$h_i = \frac{h_{di} h_i}{h_{di} + h_i} = \frac{333 \times 7310}{333 + 7310} = 319 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

FLUIDO FRIO: AIRE

LADO: DUCTO

$$\text{IV.2.6')- } a_A = 0.424 \text{ m}^2 \quad D_e = 0.0422 \text{ m}$$

$$\text{IV.2.6.1')- } G_A = \frac{1000 \text{ kg/hr}}{0.424 \text{ m}^2} = 2358.5 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}^2}$$

$$G_A = 2359 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}^2}$$

IV.2.7')- De la figura 11 del Kern para aire a 52.9°C

$$N_A = 0.0684 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}} \quad (\text{Transfor mada})$$

$$\text{IV.2.8')- } R_{eA} = \frac{2359 \times 0.0422}{0.0684} = 1455$$

IV.2.9')- De la figura 16.18 del Kern

$$j_F = 30$$

IV.2.10')- De la tabla 5 del Kern, para el aire a

$$t = 52.9^\circ\text{C}$$

$$k_A = 0.016 \text{ Btu/hr (ft}^2 \text{)} (\text{°F/ft})$$

$$k_A = 0.016 \times 1.49 = 0.0238 \text{ Kcal/hr m}^{\circ}\text{C}$$

$$k_A = 0.0238 \text{ Kcal/hr m}^{\circ}\text{C}$$

$$\left(\frac{C_p \mu}{k_A}\right)^{1/3} = \left(\frac{0.25 \times 0.0684}{0.0238}\right)^{1/3} (0.717)^{1/3} = 0.895$$

$$\phi = \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} = 1$$

IV.2.11').- Sustituyendo valores en:

$$h_f = j_F \left(\frac{k_A}{D_e}\right) \left(\frac{C_p \mu}{k_A}\right)^{1/3} \times (\phi)^{0.14}$$

$$h_f = 30 \left(\frac{0.0238}{0.0422}\right) 0.895 = 30 \times 0.56 \times 0.895 =$$

$$15.14 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El factor de ensuciamiento $R_{do} = 0.003$

$$h_{do} = \frac{1}{0.003} = 333$$

$$\frac{1}{h'_f} = R_F + R_{do} \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_{do}}$$

$$h'_f = \frac{h_f \cdot h_{do}}{h_f + h_{do}} = \frac{15.14 \times 333}{15.14 + 333} = \frac{5041.6}{348.14} = 14.48$$

En la ecuación

$r_e - r_b \sqrt{h'_f/k y_b}$, de la figura 16.13 a del Kern a:

$$Y_{b=\frac{1}{2}} \text{ espesor de la aleta} = 0.5 \times 0.00089 = 0.000445 \text{ m}$$

$$r_{e=\frac{1}{2}} \text{ De} \pm h = 0.5 (0.03175) \pm 0.01275 = 0.0286$$

$$r_{b=\frac{1}{2}} \text{ De} = 0.5(0.03175) = 0.01585$$

h'_f = Coeficiente de transferencia de calor del lado de la aleta, corregido para el factor de obstrucción =

$$14.48 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

k = conductividad térmica de la aleta, para acero al carbón, tabla 3 del Kern.

$$k = 38.8 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo valores

$$(0.0286 - 0.01585) \sqrt{\frac{14.48}{38.8 \times 0.000445}}$$

$$(0.01275) \sqrt{\frac{14.48}{0.017266}} = (0.01275) \sqrt{838.64241}$$

$$(0.01275) (28.959323) = 0.369$$

$$\frac{r_e}{r_b} = \frac{0.0286}{0.01585} = 1.804$$

De la figura 16.13 del Kern

Eficiencia de la aleta = η

$$\eta = 0.97$$

Con la ecuación 16.34 del Kern

$h'_{fi} = h'_f$ corregido a la superficie interior del tubo.

$$h'_{fi} = (\eta \times A_f \times A_o) \frac{h'_f}{A_i} ; A_i = 0.110 \text{ m}^2 \text{ (Tabla 11, Kern)}$$

$$h'_{fi} = (0.97 \times 0.557 \pm 0.08564) \frac{14.48}{0.11}$$

$$h'_{fi} = (0.54029 \pm 0.08564) 131.6363 = (0.62593) 131.6363$$

$$h'_{fi} = 82.4 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

De la ecuación 16.41 del Kern para obtener el coeficiente total de diseño de transferencia de calor basado en la superficie interior del tubo.

$$U_{Di} = \frac{h'_{fi} \cdot h'_i}{h'_{fi} \pm h'_i} = \frac{82.4 \times 319}{82.4 \pm 319} = \frac{26286}{401.4} = 65.48$$

$$U_{Di} = 65.5 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

La superficie interna de transmisión de calor de un banco

de tubos, es igual al número de tubos, por el área interna de cada tubo.

$$A_{it} = 9 \times 0.1105 = 1.49 \text{ m}^2/\text{banco}$$

$$A_i = \frac{Q}{U_{Di} A_t} = \frac{18550}{65.5 \times 102.1} = \frac{18550}{6687.6} = 2.773 \text{ m}^2$$

Número de bancos:

$$N_B = \frac{2.773 \text{ m}^2}{1.49 \text{ m}^2/\text{banco}} = 1.86 \Rightarrow 2$$

$$N_B = 2$$

O por el número de tubos

$$A_{it} = 0.1105 \times 1.5 = 0.16575$$

$$N_{\text{Tubos}} = \frac{2.773}{0.16575} = 16.7 \text{ tubos} = 17 \text{ tubos}$$

No. de Tubos = 17

Se usarán 2 bancos, uno de 9 tubos y otro de 8, de 1.5 m de largo con arreglo triangular, de tubo aletado de 3.175 cm de diámetro, cédula 40.

IV.3 Diseño del Ventilador

El fabricante proporciona la potencia del ventilador como da tos, el gasto y la caída de presión, así el primer paso será determinar

la caída de presión por fuera de los tubos, de acuerdo a la Bibliografía (VII.4), ec. 16-106.

Diámetro volumétrico

$$IV.3.1).- \quad D'_{ev} = \frac{4 \text{ Volúmen libre neto}}{\text{Superficie friccional}} = \frac{4 V_L}{S_F}$$

$$V_L = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times S_V - \frac{1}{2}(17) \times \frac{\pi}{4}(D)^2 \times L - \frac{1}{2}(17) \frac{\pi}{4}$$

$$(DE + 2h_f)^2 - DE^2 \quad exNA \times L$$

$$= 1.5 \times 0.6 \times 0.055 - \frac{1}{2}(17) \frac{\pi}{4} (0.03175)^2 \times 1.5 - \frac{1}{2}(17)$$

$$\frac{\pi}{4} (0.0571)^2 - (0.03175)^2 \frac{0.089}{100} \times 4 \times 39.3 \times 1.5$$

$$= 0.0495 - 0.0101 - 0.0031533 = 0.0362467$$

$h_f =$ altura de la aleta

$S_V =$ Sección volumétrica

$$V_L = 0.0362467 \text{ m}^3$$

$$S_F = \frac{1}{2} (17) (A_o + A_f) \times L + \text{Area del ducto}$$

Area del ducto = 2 (Ancho x Profundidad + Largo x Profundidad).

$$\text{Profundidad} = 2 \text{ bancos} \times 5.5 + 3.175 = 11 \text{ cm} + 3.175 \text{ cm}$$

$$14.175 \text{ cm}$$

$$\text{Prof} = 0.14175 \text{ m} = 0.142 \text{ m}$$

$$S_F = \frac{1}{2} (17) \times 0.643 \times 1.5 + 0.142 \text{ m} = 8.34 \text{ m}$$

Sustituyendo en IV.3.1).-

$$D'_{ev} = \frac{4(0.0363)}{8.34} = 0.0174$$

Para calcular el N_{Re} :

el cálculo: IV.2.6.1'), tenemos:

$$G_A = 2359 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}^2}$$

del cálculo IV.2.7), tenemos:

$$M_A = 0.0684 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}}$$

$$R'_e = \frac{D'_{ev} G_A}{M_A} = \frac{2359 \times 0.0174}{0.0684} = 600$$

$$R'_e = 600$$

IV.3.2).- De acuerdo con la ecuación (11-27) de la Bibliografía VII.5

$$f = 1.92 (R'_e)^{-0.145} = 1.92 (600)^{-0.145} = \frac{1.92}{(600)^{0.145}}$$

$$f = \frac{1.92}{2.515} = 0.775$$

$$f = 0.775 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$$

IV.3.3.)- Caída de presión según la ecuación 16-103 del Kern.

$$\Delta P = \frac{f G_A^2}{5.22 \times 10^{10} \times S_p G \times O} \frac{L}{D'_{ev}} \frac{D_{ev}}{S_T}^{0.4} \frac{S_L}{S_T}^{0.6}$$

Transformación de datos a Unidades Inglesas:

$$f = 0.775 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} = 0.775 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^2} \times \frac{\text{ft}^2}{144 \text{ pulg}^2} = 0.0053 \frac{\text{ft}^2}{\text{pulg}^2}$$

$$f = 0.0053 \frac{\text{ft}^2}{\text{pulg}^2}$$

.- Densidad:

$$= \frac{29}{359} \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \frac{586}{760} \times \frac{492}{654} = 0.047 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$S = \frac{0.047 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{62.5 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}} = 0.00075$$

$$L = S_V \times N_b = 2 \times 0.055 = 0.11 \text{ m} =$$

$$L = 0.361 \text{ ft}$$

$$D'_{ev} = 0.0174 \text{ m} = 0.057 \text{ ft}$$

$$S_T = S_L = 0.0635 \text{ m} = 0.208$$

$$O = 1$$

$$D'_{ev}{}^{0.4} = \frac{0.057^{0.4}}{0.208} = (0.274)^{0.4}$$

$$\frac{D'_{ev}}{S_T}{}^{0.4} = 0.596$$

$$\frac{S_L}{S_T}{}^{0.6} = 1$$

$$\frac{L}{D'_{ev}} = \frac{0.361 \text{ pie}}{0.057 \text{ pie}} = 6.3$$

$$G = 2359 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}^2} \times \frac{2.205 \text{ lb}}{\text{kg}} \times \frac{(0.3048)^2}{\text{ft}^2} = 483.2 \frac{\text{lb}}{\text{hr ft}^2}$$

$$G = 483 \frac{\text{lb}}{\text{hr ft}^2}$$

$$G^2 = 2.34 \times 10^5 \frac{\text{lb}^2}{\text{hr}^2 \text{ft}^4}$$

Sustituyendo valores:

$$\Delta P = \frac{0.0053 \times 2.34 \times 10^5}{5.22 \times 10^{10} \times 0.00075} \times 6.3 \times 0.596$$

$$\Delta P = \frac{2.34 \times 0.0053 \times 6.3 \times 0.596}{5.22 \times 75} = 14.742 \times \frac{0.0032}{391.5} = 0.0001204$$

$$\Delta P = 0.00012 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$$

$$0.00012 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} \times 2.308 = 0.0002769 \text{ ft}_{\text{H}_2\text{O}} \times \frac{12 \text{ pulg}}{\text{ft}} = 0.0033$$

pulg_{H₂O}

$$\Delta P = 0.0033 \text{ pulg}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Ahora se calculará la caída de presión a través del lecho por secar, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$AP = \frac{2fm G_A^2 (1 - f)^{3-n}}{g_c \phi_S^{3-n} \beta} \times \frac{L}{Dp}$$

Primero calcularemos el N_{Re} para conocer el factor de fricción:

$$Dp = \text{Diámetro de partícula} = 0.003 \text{ m}$$

$$G = 2359 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{ hr}}$$

$$\mu = 0.0684 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}}$$

$$N_{Re} = \frac{0.003 \times 2359}{0.0684} = 103.4 \quad N_{Re} = 103.4$$

De acuerdo a la Bibliografía (VII.I), se encuentra en régimen turbulento:

Flujo Turbulento

$$100 < N_{Re} < 20,000$$

Fig. 5.64, bibliografía I.

$$f = 1.8 \text{ y } n = 1.7$$

$$\text{Fracción vacía: } f = 39\% = 0.39$$

Factor de forma = 1 para esferas

$$\phi = 1$$

$$g_c = 9.81 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg}} \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$$

L = 3.8 cm máximo espesor de la capa

$$G^2 = 2359 \frac{\text{Kg}}{\text{hr m}^2} \times \frac{\text{h}}{3600 \text{ seg}}^2 = (0.655)^2 \frac{\text{Kg}^2}{\text{seg}^2 \text{ m}^4} = 0.429 \frac{\text{Kg}^2}{\text{seg}^2 \text{ m}^4}$$

Densidad a $t_c = 53^\circ\text{C}$

$$= \frac{0.029 \text{ Kg}}{22.4 \text{ l}} \frac{586}{760} \frac{273}{326} = 0.00084 \frac{\text{Kg}}{\text{l}}$$

$$= 0.84 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$f = 0.39 ; f^3 = (0.39)^3 = 0.0593$$

$$(1-0.39)^3 = (0.61)^3 = 0.526$$

Sustituyendo tenemos:

$$\Delta P = \frac{2(1.8)(0.429)(0.526)}{9.81 \times 0.84 \times 0.0593} \times \frac{0.038}{0.003}$$

$$\Delta P = \frac{0.8123544}{0.486} \times 12.66 = 21.16 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P = 21.16 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \times 0.2048 = 4.33 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \times \frac{\text{pie}^2}{144 \text{ pulg}^2}$$

$$\Delta P = 0.030096 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} \times 2.308 = 0.0695 \text{ ft}_{\text{H}_2\text{O}} \times 12 = 0.834 \text{ pulg}_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\Delta P = 0.834 \text{ pulg}_{\text{H}_2\text{O}}$$



QUIMICA

$$G_A = 1000 \frac{\text{Kg aire}}{\text{hr}} \times \frac{1}{0.00084 \frac{\text{Kg}}{\text{l}}} \times \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}} = \frac{1000}{0.0504} =$$

$$19841 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$G_A = 19841 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times \frac{\text{ft}^3}{28 \text{ l}} = 708 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$G_A = \frac{708 \text{ ft}^3}{\text{min}}$$

Con los valores obtenidos se recurre al fabricante de ventiladores de quien se obtienen los siguientes datos:

Potencia del ventilador	0.25 HP
Diámetro del rotor	.20 cm
Descarga	7.62 cm
Succión	10.16 cm
Velocidad del aire	106 m ³ /min.

Potencia del motor para mover la banda, proporcionada por el fabricante de bandas, debido a que no se tienen fórmulas disponibles para hacer el cálculo.

Potencia motor	0.25	HP
Rango de variación		

IV.4.- Selección del equipo auxiliar de control.

Debido al alto costo de estos accesorios y pensando en los fines que se persiguen con este equipo, se recomienda que sean los practicantes los que controlen temperaturas por medio del vapor, abriendo o cerrando válvulas según sea necesario aumentar o disminuir la temperatura. Se reco

mienda colocar tres termopares por sección, distribuidos de la siguiente forma: uno a la salida de aire del ventilador, otro a la salida del cambiador de calor y el último para medir la temperatura.

A la salida de la banda, con los tres medidores, se podrá obtener la cantidad de vapor y la eficiencia de la operación.

CAPITULO V

DISEÑO DE LA PRACTICA

V. 1.- Variables Experimentales

V. 2.- Cálculos

V.3.- Distribución del Trabajo

Variables Experimentales

Se escogerá un material que tenga entre 15 y 20% de humedad y que se secará hasta la humedad de equilibrio que puede ser hasta 0.5%.

De bibliografía escogida se obtendrá:

Densidad aparente

Densidad real

Humedad crítica

Humedad de equilibrio

Tiempo de secado

Velocidad de secado

Velocidad del aire

Temperatura del aire

Superficie de transferencia

a) Densidad aparente.

Esta nos servirá para determinar la cantidad de material que se podrá colocar en la banda, y la cantidad de producto seco por hora que se obtendrá.

b) Densidad real.-

c) Humedad crítica.-

Punto de la curva de secado donde termina el período de velocidad constante.

d) Humedad de equilibrio

Punto importante para obtener la curva de secado.

Tiempo de secado.-

La mayoría de los materiales susceptibles de secarse han sido tratados en algún tipo de secador bajo determinadas condiciones, obteniendo un tiempo determinado, que en nuestro caso servirá de guía para normar criterio, es decir, tendremos un punto de partida para definir el tiempo de residencia y con él, la velocidad de la banda.

La temperatura del aire y la velocidad del mismo, se obtienen de la misma forma que el tiempo de secado, o sea la velocidad y temperatura del aire nos darán un tiempo de secado. En esta experiencia, se harán variaciones para obtener una mayor eficiencia, queriendo decir esto, que se aplicará hasta donde sea permitido, una mayor temperatura y velocidad con el fin de optimizar el objetivo de la

práctica, que es el tiempo de secado.

Resumiendo lo anterior tenemos que para un material de terminado: se disminuirá el tiempo de residencia, se aumentará la temperatura, y la velocidad del aire. Como práctica es recomendable realizar comparaciones entre un tipo de equipo de secado y este secador de banda con circulación atravesada, ya que el incrementar o disminuir variables sin referencia de comportamiento y eficiencia sería un trabajo más bien de investigación que de introducción y familiarización del estudiante con este tipo de equipos.

En el equipo se obtendrán los siguientes datos:

- V.1.a) Temperatura de entrada y salida del aire en cada unidad (t_0 y t_2).
- V.1.b) Humedad de entrada y salida del aire en cada unidad (Y_1 y Y_2).
- V.1.c) Temperatura de entrada y salida del material (T_1 y T_2).
- V.1.d) Temperatura del aire al salir del cambiador de calor (t_1).

Lo anterior se obtiene ya teniendo como datos:

V_B .- Velocidad de la banda

θ_R .- Tiempo de residencia

V_A .- Velocidad del aire

C A L C U L O S

En caso de no contar con la superficie de transferencia, ésta se calculará según:

Para partículas esféricas:
$$a = \frac{6(1-F)}{(dp)_m}$$

Para partículas cilíndricas uniformes:

$$a = \frac{4(d/2 + Z)(1-F)}{dZ}$$

$$a = \frac{4(1-F)}{d} \text{ para cilindros largos en proporción a su diámetro.}$$

F = fracción vacía

d = diámetro

Z = altura

$(dp)_m$ = diámetro medio de partícula

a = área de transferencia

Los datos obtenidos se sustituirán en las ecuaciones correspondientes para obtener la superficie de transferencia.

V.2.1 Tiempo de secado del período de velocidad constante (teórico) más tiempo de secado del período de velocidad decreciente, que nos da el tiempo total de secado:

$$\Theta_r = \frac{L_s (X_1 - X_c)}{AN_{\max} (1 - e^{-J_D a Z_s \times 10.7114})} \left[(X_1 - X_c) + (X_c - X^*) \ln \frac{X_c - X^*}{X - X^*} \right]$$

$$\Theta_c = \frac{L_s (X_1 - X_c)}{AN_{\max} (1 - e^{-J_D a Z_s \times 10.7114})}$$

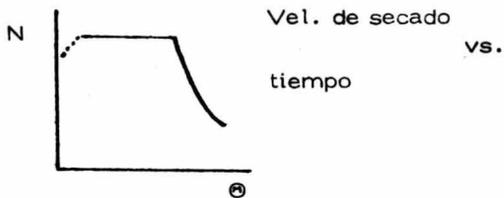
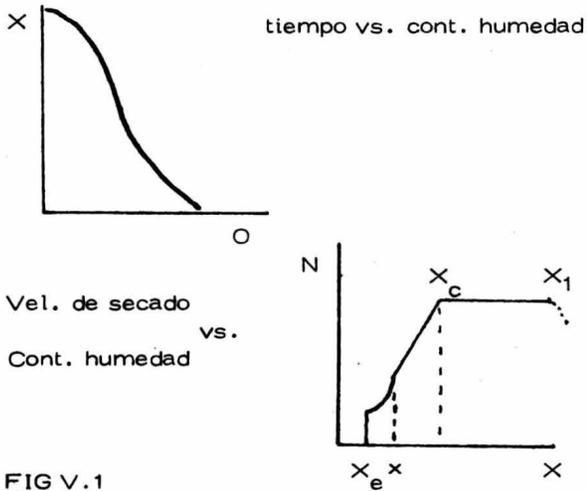
$$\Theta_d = \frac{L_s (X_c - X^*)}{N_c A} \ln \frac{X_c - X^*}{X - X^*}$$

J_D se obtiene de la gráfica 2.6 de la Bibliografía VII.2

La eficiencia en el tiempo de secado se obtendrá de:

$$\eta = \frac{\Theta_{\text{teórico calculado}}}{\Theta_{\text{secado real}}}$$

Con los datos de humedad obtenidos experimentalmente se dibujará la curva de secado: fig. V.1



V.3 Distribución del Trabajo.

Secando cinco estudiantes tenemos:

- 1.- Conectar ventilador (un estudiante).
- 2.- Determinar la velocidad de la banda a la que sea necesaria con la polea.

3.- Abrir válvulas de vapor para que entre a los cambiadores de calor.

Otro estudiante preparará el material a la granulometría deseada, para ésto se recomienda tener un material al que no se le tenga que dar forma, como: un mineral que se humedezca. Este alumno lo depositará en la tolva de alimentación, mientras esto sucede, un tercer estudiante determinará la humedad y temperatura de entrada del material.

La tolva de alimentación debe disponerse de tal forma que deposite una cama de material lo más homogénea posible, es decir, haya uniformidad en la altura de la misma.

El equipo sin cargar, debe dejarse con todos los auxiliares funcionando un tiempo razonable para calentarlo y no perder eficiencia.

Se tomarán muestras del material cada 15 minutos y en los intervalos se tomarán lecturas de humedad y temperatura, siendo el cuarto y quinto estudiantes los que las obtengan.

Los cálculos se pedirán conforme avance la práctica con el fin de que al finalizar ésta, cada estudiante participe activamente

en los resultados y criterios y no sean uno o dos los que resuelvan y pasen los datos.

Se le pedirá al practicante estudie preliminarmente los fundamentos de secado que deberán ser comprobados por el instructor al inicio de la experiencia.

CAPITULO VI

VI. 1 Costo

VI. 2 Conclusiones

COSTOS

Debido a la gran variación en los precios de los materiales que se utilizan en la fabricación de este tipo de equipos, el costo calculado en esta sección solamente servirá como referencia

Banda, características descritas en el Capítulo anterior

14.6 m², Precio por m² : 561.70 + 4%/m² \$ 8,528.85

Lámina Galvanizada Calibre 20 S.A.E. (2ª)

271 m² ; $7.738 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$; Precio por Kg: 5.70 + 4% \$ 12,431.00

Pintura Anticorrosiva a base de Aluminio

total de m² a aplicar \$ 40.00 costo por m² \$ 15.00 \$ 600.00

Angulo de 2.54 de fierro galvanizado , 70 m

costo por metro \$ 40.00 \$ 2,800.00

Ventiladores de 0.25 HP, cuatro, precio de c/u

\$ 2,214.00 \$ 8,856.00

Cilindros Tensores (Dos tubos de 20 cm de ϕ , con

tapas soldadas y en el centro un orificio de 5 cm ϕ

en donde se colocará y soldará una barra de acero

de 5 cm ϕ y de 90 cm de largo c/u) Precio \$ 1,500.00, \$ 3,000.00

Aislante de Lana mineral de 2.54 cm. de espesor		
20 m ² , costo por m ²	\$ 40.00	\$ 800.00
Motor reductor de 0.25 HP (29RPM)		\$ 4,165.00
Polea para transmisión 20 cm O		\$ 378.00
Tubo aletado de 3.175 cm de O cédula 40, con cuatro aletas cada 2.54 cm, de 1.27 cm de alto y 20 BWG, total metros 102		
costo por metro	\$ 280.00	\$ 28,560.00
Termopares 0-150°C, cuatro costo c/u		
\$ 200.00		\$ 800.00
Accesorios del cambiador de calor,		
Aprox. 25%		\$ 7,000.00
		<hr/>
		\$ 77,918.85
8% Gastos de Construcción		\$ 6,233.50
24% Mano de Obra		<hr/>
		\$ 18,700.52
	TOTAL	\$ 102,852.87

Los dos últimos porcentajes agregados pueden ser reducidos o suprimidos si se encarga la construcción del equipo al Taller del Laboratorio y la Dirección se efectúa como parte de una práctica.

VI. 1 Costo

Aunque el costo, en esta ocasión no es el factor determinante del diseño, es decir, no se cumplen con especificaciones económicas que repercutan en la utilidad de un producto al cual se le ha aplicado un proceso para fabricarlo, es importante tomar en cuenta la inversión que se realizará para complementar la información y formación de los estudiantes por lo que si se hiciera un balance económico, el rendimiento no sería peso invertido por Kg de producto seco, sino peso invertido por aprovechamiento de cada estudiante.

Sin embargo, el objetivo de este diseño, además de fines educacionales, es el de contar con equipo poco oneroso que sirva para los fines que fué creado.

Se plantearán las alternativas y criterios que llevaron a la elección de cada equipo, así como su costo.

VI. 1. 1) Gabinete.

Alternativas de elección para el bastidor:

En este punto podríamos mencionar que el túnel se fabricará de mampostería, ladrillo refractario, sin embargo tal cosa requeri

ría de cimientos, además quedaría fijo y a las temperaturas de trabajo sería un desperdicio de capital, lo que han demostrado investigadores que paneles de lámina de acero galvanizada cumple los requisitos de operación.

Dichos paneles descritos en el capítulo anterior, con lana mineral como aislante, nos dejan sin otra alternativa, por lo que se escogen.

Encontramos ventajas económicas, operaciones y de mantenimiento.

Al bastidor de ángulo de fierro galvanizado así como a los paneles se les podía aplicar pintura anticorrosiva, pero confiando en el mantenimiento que se les puede proporcionar, se puede excluir la pintura.

VI.1.2) Banda.- Se tienen tres alternativas.

Banda de fierro

Banda de fierro galvanizado

Banda de Acero Inoxidable

La primera se desecha por la poca durabilidad que tiene y cuesta apenas 20% menos que la segunda opción. La tercera también se desecha por ser demasiado cara, de cinco a seis veces más que la banda de la segunda opción, que es la que se selecciona por precio y durabilidad, contando siempre con un mantenimiento adecuado, cada vez que se utilice, secarla completamente.

VI.1.3) Rodillos

Para esta parte solamente había otra alternativa: cadenas, que por ser demasiado caras se eliminan.

VI.2) CONCLUSIONES

Conclusiones:

Para los fines que fué diseñado este secador, experimentales, considero que se van a cumplir. El costo del equipo es razonable dentro de los límites económicos para secadores de este tipo de plantas piloto.

Para este diseño se toman como guía datos experimentales obtenidos en secadores similares, sin embargo, como todo equipo, deberá ser analizado para mejorarlo y optimizarlo, en particular, se re

comienda variar cantidades de aire y vapor para dar volúmenes y temperaturas diferentes en cada sección del aparato que ayudarán a estudiar verdaderamente el comportamiento y mecanismos de secado de diferentes materiales, mecanismos que solamente han sido planteados teóricamente con márgenes de error considerables.

Como mencionaba en la introducción de este trabajo, la operación de secado adquiere cada vez más importancia, principalmente porque es un auxiliar muy importante para la conservación de alimentos, cuya escasez es el principal problema que actualmente afecta a la humanidad.

El secar o deshidratar granos y todo tipo de alimentos permitirá al hombre aprovechar al máximo el producto de la tierra, mismos que podrán ser almacenados o aprovechados industrialmente, sin que por cuestiones de nuestra estructura social, se permita que se pudran o se tiren al mar para mantener estables sus precios.

Al estudiar y comprender esta importante operación, que tiene sus inicios en los albores de la humanidad y que desde el punto de vista científico no ha sido descrita en forma totalmente satisfactoria, el practicante deberá entender la labor que como profesionalista le espe

ra en el futuro.

Este tipo de secador es ya un mejoramiento del Secador de Túnel con carros que soportan chárolas pero el conocimiento de él, servirá para que más adelante alguien pueda perfeccionarlo, como asentaba anteriormente; la eficiencia del equipo solamente podrá ser evaluada en razón directa del aprovechamiento empírico y cognocitivo que se adquiera de él.

CAPITULO VII

BIBLIOGRAFIA

- VII.1) "Manual del Ingeniero Químico", John H. Perry,
Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana,
3a. Ed. México, D.F., 1958.
- VII.2) "Mass Transfer Operation", R.E. Treybal,
McGraw-Hill Book, Co., Inc. 1955.
- VII.3) "Food Deshydration", Vol. II, W.B. Arsdel, B.S.
& M.J. Copley The AVI Publishing Co., Ing. 1964.
- VII.4) "Procesos de Transferencia de Calor", D.Q. Kern,
1a. Ed. en Español. Cfa. Editorial Continental, S.A.
1965.
- VII.5) "Fluids Dynamics and Heat Transfer", Knudsen &
Katz, McGraw-Hill Co., Inc. Tokyo, 1958.
- VII.6) "Unit Operations of Chemical Engineering",
McCabe & Smith McGraw-Hill Book Co. Inc. N.Y.
1956.
- VII.7) "Project Engineering of Process Plants",
Howard F. Rase and M.H. Barrow-John Wiley and
Sons. 1957.

- VII.8) "Principios de Operaciones Unitarias", A.S.
Foust, G.W. Clump L. Maus, L. Bryce Anderen,
Cía. Editorial Continental, S.A., México, 1961.
- VII.9) "Food Processing Operations", J.L. Heid and
Maynard A. Joslyn, Wesport, Connecticut, The
AVI Publishing Co., Inc. 1963.