

300618

00  
Zej.



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

**ESCUELA DE QUIMICA  
INCORPORADA A LA U.N.A.M.**

**DISEÑO DE UN SEGADOR ROTATORIO PARA EL LABORATORIO  
DE LA UNIVERSIDAD LA SALLE**

***TESIS PROFESIONAL***

**Que para obtener el Título de:  
INGENIERO QUIMICO**

**p r e s e n t a**

**MARIA JOSE MORON ALONSO**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**México, D. F.**

**1986**



## **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.

## I N D I C E

	Pags.
INTRODUCCION	1
I.- PRINCIPIOS DE SECADO	3
I.1. Diferencias importantes entre secado y evaporación.	5
I.2. Definición de secado y clasificación	5
I.3. Humedad	6
I.4. Humedad molar o saturación molar	6
I.5. Humedad absoluta o saturación absoluta	7
I.6. Humedad relativa o saturación relativa	7
I.7. Humedad porcentual o saturación porcentual	7
I.8. Punto de rocío	8
I.9. Volumen específico del gas húmedo	8
I.10. Calor específico del gas húmedo	9
I.11. Entalpía específica	9
I.12. Humedad de equilibrio	10
I.13. Humedad libre	10
I.14. Humedad ligada o agua ligada	11
I.15. Humedad desligada o agua desligada	11
I.16. Temperatura húmeda o temperatura de termómetro húmedo	11
I.17. Temperatura de saturación adiabática	12
I.18. Velocidad de secado	13
I.19. Periodos de secado	13
I.20. Tiempo de secado	14
II.- SECADORES ROTATORIOS	15

II.1.	Clasificación general de secadores	16
II.2.	Clasificación de secadores rotatorios	17
II.3.	Cálculo de secadores continuos	22
II.4.	Tiempo de retención	25
II.5.	Carga de sólidos al secador	27
II.6.	Flujo de masa del gas	27
II.7.	Relación longitud diámetro del secador	28
II.8.	Velocidad de rotación del cilindro	28
II.9.	Elevadores	28
II.10.	Pendiente del secador	29
III.-	DISERIO DE EQUIPO	30
III.1.	Bases de diseño	31
III.2.	Cálculo de la longitud y diámetro del secador	33
III.3.	Cálculo de la variación de volumen de gases que va a mover el ventilador	43
III.4.	Pérdidas por convección	44
III.5.	Cálculo del tiempo de residencia	47
III.6.	Diseño del ciclón	48
III.7.	Planos	54
IV.-	ESTIMACION DE COSTO	58
V.-	PRACTICAS PROPUESTAS	64
VI.-	CONCLUSIONES	69
	BIBLIOGRAFIA	71
	NOMENCLATURA	76

## INDICE DE FIGURAS Y PLANOS

		Pags.
FIGURA N°1	Dibujo de un secador rotatorio de calor directo y flujo de aire en contracorriente.	20
FIGURA N°2	Elevadores o aletas en un secador rotatorio.	20
FIGURA N°3(A)	Dibujo de un secador giratorio indirecto.	21
FIGURA N°3(B)	Dibujo de un secador giratorio con tuberías para vapor de agua, indirecto.	21
FIGURA N°3(C)	Dibujo de un secador giratorio indirecto directo.	21
FIGURA N°4	Esquema y dimensiones de un ciclón	50
PLANO SR-01	Secador rotatorio. Arreglo general. Modelo laboratorio.	55
PLANO SRD-01	Detalles. Secador rotatorio. Modelo laboratorio.	56
PLANO SRD-02	Aletas del cilindro. Secador rotatorio. Modelo laboratorio.	57
FIGURA N°5	Esquema del secador rotatorio para el laboratorio.	68

## INDICE DE GRAFICAS

GRAFICA N°1	Representación de la humedad frente al tiempo de secado.	13
-------------	--	----

GRAFICA N°2	Representación de las temperaturas y humedades de entrada y salida, del sólido y del gas, en un secador rotatorio con funcionamiento a contracorriente.	22
GRAFICA N°3	Representación de las tres zonas en que se divide el secado, en un secador rotatorio con funcionamiento a contracorriente.	22

#### INDICE DE TABLAS

TABLA 1	Análisis inicial	36
TABLA 2	Análisis final	39
TABLA 3	Peso promedio de gases secos	40
TABLA 4	Resultados	42

INTRODUCCION

El secado, es una de las operaciones más frecuentes en los procesos industriales, por lo que su estudio forma una parte indispensable dentro de la formación de un Ingeniero Químico.

El objetivo fundamental de este trabajo, es realizar el diseño de un secador rotatorio para el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad, que sirva de base para su posterior construcción, lo cual sería muy importante ya que aumentaría el material didáctico experimental existente.

Este secador, se ha diseñado para secar arena, con flujo de masas en contracorriente, pero se le ha dado al diseño una gran flexibilidad, de tal manera que pueda ser utilizado para secar otros materiales, tales como aserrín, viruta de madera, ácido acetilsalicílico, etc. . . dejando libertad para el docente que imparta en un futuro la materia correspondiente. Basados en esto, nuestro secador rotatorio podrá ser utilizado con pendiente y velocidad de rotación variables. El cilindro será de vidrio, con lo cual los alumnos podrán observar el funcionamiento del aparato.

Esta tesis, se divide en seis capítulos. En el primero se dan los principios de secado. En el segundo capítulo, se da una clasificación general de secadores, una clasificación de secadores rotatorios y el cálculo de secadores. Así mismo, se muestran una serie de recomendaciones referentes a la pendiente, tiempo de retención, carga de sólidos, flujo de masa del gas, elevadores, relación longitud diámetro del secador, etc. . . En el tercer capítulo, se dan las bases de diseño, el cálculo de la longitud y diámetro del secador, balance de materia, cantidad necesaria de combustible, cantidad de calor necesario a los gases, etc

...También se realiza el cálculo que posteriormente servirá para la selección del ventilador. Se calculan las pérdidas por convección y como nuestro diseño es esencialmente con fines didácticos, se incluye el cálculo de un recolector de polvos, del tipo ciclón, para evitar el arrastre de los mismos, ya que como se comentó anteriormente podrá ser usado con diferentes materiales. En éste caso se diseñó para ácido acetilsalicílico, con el objeto de que sirva para ambas carreras de la Escuela de Química. En éste capítulo, se incluyen planos de construcción, uno de arreglo general y dos de detalles con el fin de que sean útiles para la futura construcción del secador.

En el cuarto capítulo, se realizó una estimación de costo con los precios correspondientes a la presentación de ésta tesis. En el quinto capítulo se presentan dos prácticas de laboratorio, incluyendo el esquema del secador, objetivos, procedimientos y cuestionarios. En el último capítulo, se dan las conclusiones de éste trabajo.

CAPITULO I

PRINCIPIOS DE SECADO

### 1.1. DIFERENCIAS IMPORTANTES ENTRE SECADO Y EVAPORACION:

1) El secado, es la eliminación de relativamente pequeñas cantidades de agua de un sólido o de un material casi sólido.

La evaporación, es la eliminación de cantidades relativamente grandes de agua de soluciones.

2) El secado implica la eliminación del agua a temperaturas menores de su punto de ebullición.

La evaporación es la eliminación del agua a su punto de ebullición.

3) En el secado, el agua se elimina normalmente por circulación de aire u otros gases, sobre el material a secar. Esto es con el objeto de que transporte vapor de agua, aunque en algunos procesos de secado no se utilizan gases transportadores.

En la evaporación, el agua se elimina del material que la contiene prácticamente como vapor de agua pura.

### 1.2 DEFINICION DE SECADO Y CLASIFICACION:

El secado, es la separación de la humedad de los sólidos (o de los líquidos) por evaporación en una corriente gaseosa.

En cualquier proceso de secado, hemos de tener en cuenta, los mecanismos de transmisión de calor y transporte de materia.

Generalmente, el líquido a secar suele ser vapor de agua, y el gas empleado aire.

El secado, puede ser:

- a) Secado por contacto directo
- b) Secado indirecto

a) El calor necesario para la vaporización de agua lo suministra el aire

El secado directo, puede efectuarse de modo:

- a.1) Discontinuo: Cargado el secador, se hace circular el aire de secado y se supone que sus condiciones permanecen constantes con el tiempo.
- a.2) Continuo: La alimentación del sólido a secar como el aire, entran continuamente en el secador, variando a través del mismo las condiciones del aire y el sólido a secar.
- b) El calor se suministra por una fuente térmica, a través de una superficie metálica en contacto con el objeto a secar.

Los secadores indirectos, podrían también llamarse secadores por conducción o de contacto. La fuente de calor puede ser vapor de gases de combustión, sales fundidas, líquidos, electricidad...etc.

### 1.3. HUMEDAD.

El contenido de humedad de un sólido, puede expresarse sobre base seca o base húmeda. Es más conveniente, referir la humedad a base seca, ya que ésta permanece constante a lo largo del proceso de secado.

Humedad del sólido, es la masa de agua que acompaña a la unidad de sólido seco.

Suponiendo que el comportamiento de la mezcla, cumple con las leyes de los gases ideales:

$$P = p_v + p_g \quad (1.1)$$

La fracción molar del vapor, es igual a la composición en volumen:

$$y = \frac{n_v}{n_t} = \frac{p_v}{p} \quad (1.2)$$

### 1.4. HUMEDAD MOLAR O SATURACION MOLAR:

Es la relación entre los números de moles de vapor y de gas contenidos en una determinada masa gaseosa.

$$Y_m = \frac{n_v}{n_g} = \frac{p_v}{p_g} = \frac{p_v}{p - p_v} \quad (1.3)$$

#### 1.5. HUMEDAD ABSOLUTA O SATURACION ABSOLUTA:

Es la relación entre la masa del vapor y la masa del gas contenido en una masa gaseosa:

$$Y = \frac{M_v}{M_g} \quad Y_m = \frac{M_v}{M_g} = \frac{p_v}{p - p_v} \quad (1.4)$$

Si nos estamos refiriendo, a la mezcla aire-agua y tomando para el aire un peso molecular medio igual a 29, se obtiene:

$$Y = \frac{18}{29} \frac{p_v}{p - p_v} = 0.62 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (1.5)$$

#### 1.6. HUMEDAD RELATIVA O SATURACION RELATIVA:

Es el cociente entre la presión parcial del vapor y la presión de vapor a la misma temperatura de bulbo seco.

$$\varphi = \frac{p_v}{p_v^*} \quad (1.6)$$

#### 1.7. HUMEDAD PORCENTUAL O SATURACION PORCENTUAL:

Es la relación entre la humedad existente entre la masa gaseosa y la que existiría si estuviera saturada.

$$\varphi_p = \frac{Y}{Y^*} = \frac{p_v}{p_v^*} \left( \frac{p - p_v^*}{p - p_v} \right) \quad (1.7)$$

### 1.8. PUNTO DE ROCIO:

Es la temperatura que alcanza la masa de gas húmedo en la saturación por enfriamiento a presión constante.

Cuando se ha alcanzado esta temperatura y continuamos enfriando la mezcla, se irá condensando el vapor y persistirán las condiciones de saturación.

### 1.9. VOLUMEN ESPECIFICO DEL GAS HUMEDO:

Es el volumen ocupado por la mezcla que contiene 1 Kg de gas.

$$v = \left( \frac{1}{M_g} + \frac{Y}{M_v} \right) \frac{R \cdot T}{P} \quad (1.8)$$

En el caso de la mezcla aire-vapor de agua:

$$v = \left( \frac{1}{29} + \frac{Y}{18} \right) \frac{0.082 \cdot T}{P} \quad (1.9)$$

I.10. CALOR ESPECIFICO DEL GAS HUMEDO:

Es el calor que hay que suministrar a 1 Kg de gas y al vapor que contiene, para elevar 1°C su temperatura, manteniendo la presión constante:

$$C = (C_p)_g + (C_p)_v Y \quad (1.10)$$

Para el caso de la mezcla aire-vapor de agua:

$$C = 0.24 + 0.46 Y \quad (1.11)$$

I.11. ENTALPIA ESPECIFICA:

Es la suma del calor sensible de 1 Kg de gas y el calor latente de vaporización del vapor que contiene a la temperatura a la que se refieren las entalpías:

$$i = C (t - t_0) + \lambda_0 Y \quad (1.12)$$

Si nos encontramos en el caso aire-agua:

$$i = (0.24 + 0.46 Y) t + 597.2 Y \quad (1.13)$$

Para esta ecuación, se ha tomado como entalpía de referencia la del agua líquida a 0°C.

### I.12. HUMEDAD DE EQUILIBRIO:

Cuando un sólido húmedo, se pone en contacto durante tiempo suficiente, con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes, se alcanzan las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. El vapor de agua que acompaña al aire, ejerce una presión de vapor determinada.

Las condiciones de equilibrio se alcanzan, cuando la presión de vapor del agua que acompaña al sólido húmedo, es igual a la presión parcial del agua en el aire.

La humedad de equilibrio del sólido, es la humedad alcanzada por el sólido en equilibrio con el aire, en las condiciones dadas.

La humedad de equilibrio,  $X^*$ , es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de humedad y temperatura determinadas.

Si la humedad del sólido, es mayor que la de equilibrio, el sólido se secará hasta alcanzar la humedad de equilibrio. Si la humedad del sólido es menor que la de equilibrio, éste absorberá agua del aire hasta que alcance las condiciones de equilibrio.

La humedad de equilibrio, es función de:

- a) La naturaleza del cuerpo.
- b) Del estado de su superficie.
- c) La temperatura.

### I.13. HUMEDAD LIBRE:

Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equi-

librio con el aire en las condiciones dadas:

$$F = X - X^* \quad (I.14)$$

#### I.14. HUMEDAD LIGADA O AGUA LIGADA:

Es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado; o bien la humedad mínima del sólido necesaria para que éste deje de comportarse como higroscópico.

Se entiende como cuerpo higroscópico, cuando la presión de vapor del agua que acompaña al sólido, es menor que la tensión de vapor del agua a la misma temperatura, y nos referimos a cuerpo húmedo, cuando la presión de vapor del agua que acompaña al sólido, es igual a la tensión de vapor del agua a esa temperatura.

#### I.15. HUMEDAD DESLIGADA O AGUA DESLIGADA:

Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada, es decir la humedad libre del sólido en contacto con aire saturado. Si el sólido tiene humedad desligada se comportará como húmedo.

#### I.16. TEMPERATURA HUMEDA O TEMPERATURA DE TERMOMETRO HUMEDO:

Es la temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña masa de líquido en contacto con una masa mucho mayor de gas húmedo:

$$p_w^* - p_v = \frac{h_c}{K_g H_v \lambda_w} (t - t_w) \quad (1.15)$$

$$Y_w - Y = \frac{h_c / K_Y}{\lambda_w} (t - t_w) \quad (1.16)$$

En el caso de la mezcla aire-agua, el coeficiente  $\frac{h_c}{K_g H_v w}$

vale aproximadamente 0.5. (1)

Para determinar  $t_w$ , se realiza por medio de la ecuación psicrométrica:

$$p_w^* - p_v = 0.5 (t - t_w) \quad (1.17)$$

El cociente  $h_c / K_Y$ , se le conoce con el nombre de coeficiente psicrométrico, el cual se determina por la expresión:

$$h_c / K_Y = C (Sc/Pr)^{0.56} \quad (1.18)$$

### 1.17. TEMPERATURA DE SATURACION ADIABATICA:

Es la temperatura alcanzada por una masa de gas cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas. Su cálculo se realiza por la siguiente expresión:

$$(Y_s - Y) = \frac{C}{\lambda_s} (t - t_s) \quad (1.19)$$

En el caso específico de aire-vapor de agua, la temperatura húmeda y la temperatura de saturación adiabática, prácticamente coinciden.

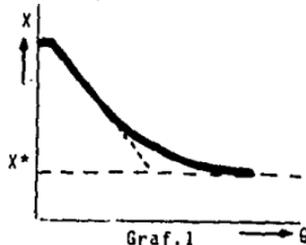
### 1.18. VELOCIDAD DE SECADO:

Es la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo:

$$W = -\frac{S}{A} \left( -\frac{dX}{d\theta} \right) \quad (1.20)$$

### 1.19. PERIODOS DE SECADO:

En un principio, se observa que la humedad permanece constante, ya que éste es un periodo de precalentamiento.



A continuación, vemos que la humedad del sólido, disminuye linealmente con el tiempo de secado, es decir la velocidad de secado permanece constante. Esto continúa, hasta que la humedad del sólido alcanza un valor crítico. Desde éste momento, la velocidad de secado disminuye, llegando a ser cero cuando la humedad del sólido alcanza el valor de equilibrio con el aire en condiciones constantes de operación.

Resumiendo, tenemos dos periodos: uno de velocidad constante y otro de velocidad decreciente. El primero va desde una humedad inicial  $X_1$

hasta la humedad crítica  $X_c$ . Esta humedad crítica, depende de:

- 1) Condiciones del aire de secado
- 2) Espesor del material a secar

El segundo periodo, va desde la humedad crítica  $X_c$ , hasta la humedad final del sólido  $X_f$ , cuyo valor límite es la humedad de equilibrio  $X^*$ .

El tiempo crítico de secado, es el tiempo de secado necesario para que la humedad del sólido descienda desde su valor inicial hasta el crítico.

#### I.20. TIEMPO DE SECADO:

$$\theta = -\frac{S}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{W} \quad (1.21)$$

En el tiempo de secado, también se distinguen dos periodos:

- 1) Periodo anticrítico: Dado que en éste periodo  $W$  es constante, se tiene que: (1)

$$\theta_a = -\frac{S}{A} \frac{X_i - X_c}{W_c} \quad (1.22)$$

- 2) Periodo poscrítico: En éste periodo  $W$  decrece linealmente. (1)

$$\theta_p = -\frac{S}{A} \left[ \frac{X_c - X_f}{W_c} - \frac{W_c}{W_f} \ln \frac{W_c}{W_f} \right] \quad (1.23)$$

CAPITULO II

SECADORES ROTATORIOS

## II.1. CLASIFICACION GENERAL DE SECADORES:

Desde el punto de vista del material a secar, los secadores pueden ser clasificados de la manera siguiente: (6)

I.- Materiales en hojas o masas, transportados por bandejas o transportadores:

A.- Secadores discontinuos:

A.1. De departamentos a la presión atmosférica.

A.2. De bandeja al vacío.

B.- Secadores continuos:

B.1. De túnel.

II.- Materiales granulares o sueltos:

A.- Secadores rotatorios:

A.1. Rotatorios normales.

A.2. Roto-Louvre.

B.- Turbosecadores.

C.- Secadores de transportador.

D.- Combinación de secador filtro.

III. Materiales en hojas continuas:

A.- Cilindros secadores.

B.- Secadores de festón.

IV.- Pastas, lodos o tortas cristalinas:

A.- Secador agitador:

A.1. Atmosféricos.

A.2. Al vacío.

B.- Secadores por pulverización.

VI.-Métodos especiales:

- A.- Por rayos infrarrojos.
- B.- Por calentamiento dieléctrico.
- C.- Por liofilización.

11.2. CLASIFICACION DE SECADORES ROTATORIOS:(4)

1.-CALOR DIRECTO,FLUJO A CONTRACORRIENTE:

1.1.Se usa para materiales que puedan calentarse a temperaturas elevadas:arena,minerales,piedra caliza,arcillas...etc.

1.2.Se puede utilizar un gas de combustible como gas de secado.En el caso de trabajar con sustancias que no se deben de calentar excesivamente,como algunos productos químicos cristalinos,tales como sulfato de amonio y azúcar de caña,se utilizará aire caliente.

En los secadores rotatorios,el sólido a secar,generalmente se intrduce de manera continua por uno de los extremos de un cilindro giratorio,y el aire caliente fluye por el otro extremo(Fig.1.).El cilindro está instalado en un pequeño angulo con respecto a la horizontal. El sólido se mueve lentamente a través del aparato.

En el interior del secador,hay unos elevadores(Fig.2.),que se extienden por las paredes del cilindro en la longitud total del secador y que levantan el sólido y lo riegan en una cortina móvil a través del aire,de tal manera que lo exponen completamente a la acción secadora del gas.Este hecho también contribuye al movimiento de avance del sólido.

En el extremo de alimentación del sólido,unos cuantos elevadores

espirales pequeños, ayudan inicialmente al sólido hacia adelante, antes de que éste llegue a los elevadores principales.

El secador, puede ser alimentado con gas de combustible caliente, generalmente se utiliza un ventilador de extracción para jalar el gas a través del secador. Se puede interponer un recolector de polvo del tipo ciclón, filtro o de lavado entre el ventilador y el gas saliente.

## 2.-CALOR DIRECTO, FLUJO A CORRIENTE PARALELA:

2.1. Se usan para sólidos que pueden secarse con un gas de combustible, sin miedo a contaminarlos.

2.2. Los materiales a secar, no deben calentarse a temperaturas muy elevadas por temor a dañarlos, tales como yeso, pirritas de hierro y materiales orgánicos como la turba y la alfalfa.

En éste tipo de secadores, el gas y el sólido entran por el mismo extremo del secador.

## 3.-CALOR INDIRECTO, FLUJO A CONTRACORRIENTE:

3.1. Se usa para sólidos que pueden calentarse a temperaturas elevadas, pero que no deben de estar en contacto con el gas, tales como los pigmentos blancos y similares. (Fig. 3.A).

3.2. El secador se puede encerrar en una estructura de ladrillo y rodearse completamente con los gases calientes de combustible.

3.3. El flujo de aire debe ser mínimo, ya que el calor se proporciona por conducción a través de la estructura o tubería central. Por éste motivo, se pueden manejar los sólidos muy finamente divididos que tienden a formar polvo.

Para materiales, tales como alimento para ganado, granos para cerveza, plumas, ... etc. se puede utilizar un secador de tubería con vapor. (Fig. 3.B). Este puede o no tener elevadores y se puede construir con

una, dos o más hileras concéntricas de tubos calentados con vapor.

#### 4.-DIRECTO-INDIRECTO:

4.1. Son más económicos de manejar que los secadores directos.

4.2. Se utilizan para secar sólidos que pueden secarse a altas temperaturas, mediante un gas combustible y cuando la humedad inicial del sólido es muy elevada.

4.3. El gas puede entrar al tubo central (Fig. 3.C) a  $650-980^{\circ}\text{C}$  ( $1200$  a  $1800^{\circ}\text{F}$ ), ser enfriado hasta  $200-480^{\circ}\text{C}$  ( $400-900^{\circ}\text{F}$ ), cuando pasa por primera vez por el secador y ser regresado a través del espacio de secado anular, ya en contacto directo con el sólido, para que se enfríe más aún hasta  $60-70^{\circ}\text{C}$  ( $140-170^{\circ}\text{F}$ ), durante la descarga.

4.4. La lignita, carbón y coque se pueden secar en atmósfera inerte en éste secador a temperaturas relativamente altas sin peligro de que se quemen o de que haya una explosión de polvos.

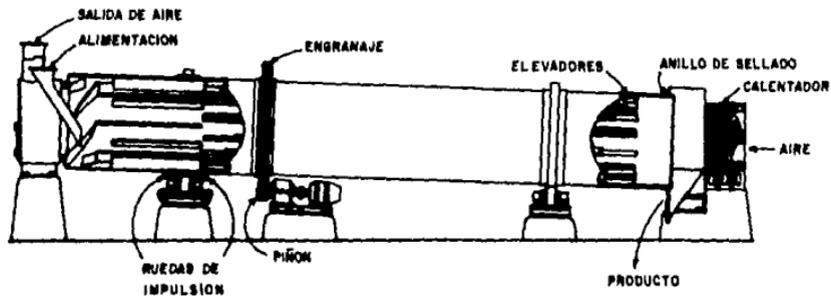


FIGURA No. 1



FIGURA No. 2

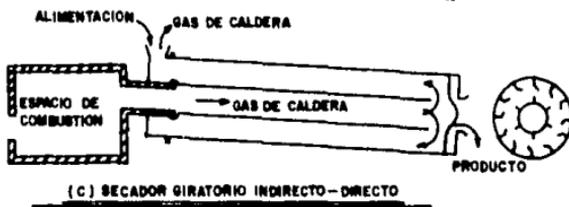
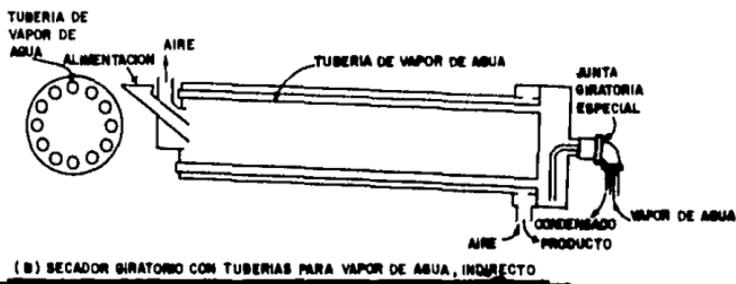
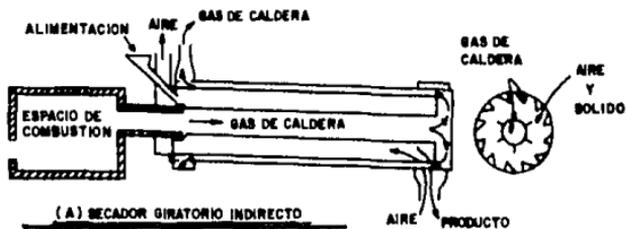


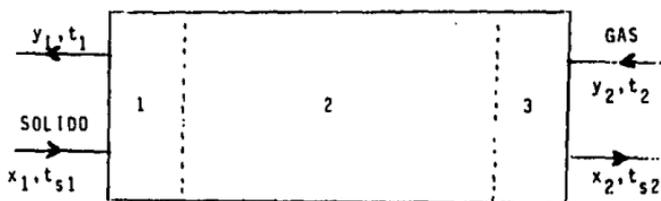
FIGURA No. 3

### 11.3. CÁLCULO DE SECADORES CONTINUOS:

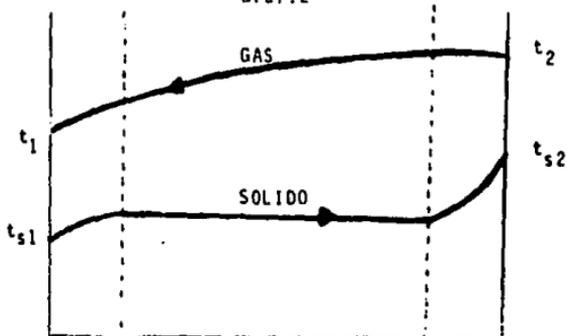
El método que se va a utilizar en el siguiente trabajo, es el basado en la transmisión de calor.

En los secadores continuos, a los cuales pertenecen los secadores rotatorios, la temperatura del aire y la del sólido, varían a lo largo del secador.

Para calcular la longitud del secador, vamos a emplear elementos de transmisión basados en la convección del calor y la longitud de la unidad de transmisión.



Graf. 2



Graf. 3

Las gráficas anteriores, representan un secador adiabático continuo con funcionamiento en contracorriente. Se observa que la temperatura

$$z = H_{OT} N_{OT} \quad (11.4)$$

$$N_{OT} = \int_1^2 \frac{dt}{t - t_s} \quad (11.4)$$

Para la sección central del secador:

$$N_{OT} = \pm \ln \frac{t_2 - t_w}{t_1 - t_w} \quad (11.5)$$

El signo más es para flujo a contracorriente, y el menos es para flujo en corriente directa.

El número de elementos de transmisión, debe estar comprendido entre 1.5 y 2.5, ya que experimentalmente se ha demostrado que los secadores rotatorios operan más económicamente cuando  $N_{OT}$  se encuentra entre estos valores. (3)

Para los secadores rotatorios, el valor de  $U_a$  se calcula por la ecuación de Friedman y Marshall: (1)

$$U_a = \frac{57 G^{0.16}}{d} \quad (11.6)$$

con lo que:

$$H_{OT} = 0.0175 G^{0.64} C d \quad (11.7)$$

que es aplicable al intervalo de operación comprendido entre valores de  $G$  de 100 y 50,000  $\text{Kg} / \text{m}^2 \text{ h}$  (1)

El diámetro del secador, se calcula por:

$$d = \sqrt{\frac{4 W_G}{\pi G}} = \sqrt{\frac{W_G}{0.785 G}} \quad (11.8)$$

El diámetro debe de estar comprendido entre 30 cm y 3.0 m para fines industriales y su equivalencia es del 10 al 25% de la longitud total del secador (1)

#### 11.4. TIEMPO DE RETENCION:

El tiempo de retención del sólido en el secador, debe ser igual al tiempo requerido de secado. Este para cada partícula puede diferir de aquel del promedio, con lo que la calidad del producto puede que no sea uniforme.

El tiempo de retención, depende:

- De la densidad del sólido.
- Del ángulo de reposo del sólido.
- De la distribución de los elevadores en el secador.
- De la inclinación del secador.
- De la masa de materiales dentro del secador.

Existen varios factores, que pueden provocar el movimiento de las partículas sólidas a través del secador rotatorio:

1) Cuando el secador da vueltas, cada partícula se levanta mediante los elevadores y se deja caer. En cada caída, la partícula avanza una cierta distancia  $dS$ , entendiéndose por  $d$  el diámetro del secador y por  $S$  la pendiente del mismo.

Para un secador de longitud  $z$ , dando vueltas a  $N$  rpm, con una inclinación  $S$ , el tiempo de pasaje de una partícula sería proporcional a :

$$\frac{z}{S d N} \quad (2)$$

Esto se conoce con el nombre de acción de volteo.

2) Las partículas que golpean el fondo del tambor, rebotan y aquellas que golpean otras partículas, ruedan sobre ellas; en tanto que los sólidos no sean levantados por los elevadores, pueden moverse aún hacia la salida del secador deslizando unos sobre otros.

Estos efectos, son los llamados acción del horno, alterando profundamente el tiempo de retención de una partícula dentro del secador.

3) El gas secante que sopla a través del secador, avanza o retrocede al sólido en su viaje, dependiendo de si se trata a contracorriente o corriente en paralelo.

El transporte de partículas mediante la corriente gaseosa, puede ser estimada solamente en forma empírica, ya que la velocidad del asentamiento está obstaculizada por el gran número de partículas presentes.

Bajo estas consideraciones y gracias a los datos obtenidos en secadores de plantas piloto, Friedman y Marshall ofrecen la siguiente relación: (7)

$$\theta = \frac{0.23 z}{S N^{0.9} d} + \frac{0.6 B z G_v}{G_F} \quad (11.9)$$

Las unidades para la ecuación anterior son:

$\theta$	minutos
$z$	pies
$S$	pie/pie
$N$	rpm
$d$	pies

$G$  lb/ pie<sup>2</sup> h

$G_r$  lb material seco/h pie<sup>2</sup> de sección transversal

$B$  es una constante que depende del tamaño de la partícula del material que se procesa y que es igual a  $5.2 (D_p)^{-0.5}$ .

El signo más indica flujo a contracorriente, y el signo menos indica flujo a corriente paralela.

### 11.5. CARGA DE SÓLIDOS AL SECADOR:

La carga de sólidos húmedos en secadores rotatorios, afecta notablemente su operación. Si hay poca carga, reducirá la proporción de producción. Si hay demasiada cantidad, dará como resultado una acción de volteo incompleta e irregular, con lo que mucho del sólido se rodrá simplemente en el fondo del secador, dando como resultado un producto final húmedo. Como resultado, el secado será irregular y la potencia necesaria para dar vuelta al secador, será considerable.

Hay mayor peligro de subrecargar un secador, que de cargarlo en forma insuficiente. La experiencia indica que usando del 3 al 10% del volumen del secador se proporciona una operación satisfactoria. (2)

### 11.6. FLUJO DE MASA DEL GAS:

Generalmente se desea mantener el polvo en suspensión, abajo del 2 al 5 del material de alimentación como máximo. Para ello se utilizan flujos desde 0.27 hasta 13.6 Kg gas/m<sup>2</sup>.s. ( 200 a 10,000  $\frac{\text{lbm}}{\text{pie}^2 \cdot \text{h}}$  )

según el sólido. Para la mayoría de los sólidos a 35 mallas (  $D_p = 0.4$  mm) es 1.75 kg/m<sup>2</sup>.s. ( 1,000 lbm/ pie<sup>2</sup>h ) (4)

Friedman y Marshall, reportan que el aserrín empieza a ser arrastrado en flujos de aire excesivamente bajos,  $< 250 \text{ lb/h pie}^2$ . (2)

La arena muy fina de forma granular, no muestra el efecto de arrastre sino hasta las  $1,000 \text{ lb/h pie}^2$  de gasto de aire (2)

El arrastre, es menos severo para flujo a contracorriente que para flujo en paralelo, puesto que la alimentación húmeda actúa hasta cierto punto como un colector de polvo.

El arrastre, también depende del diseño de las entradas de la alimentación y de los puntos terminales.

#### II.7. RELACION LONGITUD DIAMETRO DEL SECADOR:

Los secadores se construyen normalmente con relaciones longitud diámetro:  $z/d$  en un rango de 4 a 10. (3)

#### II.8. VELOCIDAD DE ROTACION DEL CILINDRO:

Las velocidades de rotación, son tales que proporcionan velocidades periféricas de 0.2 a 0.5 m/s. (40-100 pie/min). (4)

#### II.9. ELEVADORES:

Para muchos fines, los elevadores se extienden desde la pared del secador hasta una distancia de 8 al 12% del diámetro. (4)

Su número varía desde  $2d$  hasta  $3d$  ( $d$  en pies). (3)

Deben de poder levantar la retención sólida total, a fin de minimizar de ésta forma la acción del horno, lo cual lleva a tiempos de retención menores.

II.10.PENDIENTE DEL SECADOR:

Las pendientes están generalmente en el rango de 0 a 0.88 m/m.(4)

### CAPITULO III

### DISEÑO DEL EQUIPO

### III.1. BASES DE DISEÑO:

Nuestro secador, tendrá máxima flexibilidad para ser usado a diferentes condiciones de operación y con diversos materiales. Se considerará pendiente variable, velocidad de rotación variable; se calculará un ciclón a la salida de los gases del secador para evitar el arrastre de polvos, de tal manera que tendrá facilidades para trabajar a diferentes condiciones de operación.

La caldera que se encuentra situada en el laboratorio de Ingeniería Química, se observó que trabaja con diesel como combustible, por lo que se supone conveniente, que nuestro secador utilice el mismo combustible.

El diseño se realizará para un secador rotatorio, de calor directo, con flujo a contracorriente.

Las bases para nuestro cálculo, serán las siguientes:

- 1) El material a secar será arena.
- 2) La temperatura de los gases de entrada será 80°C.
- 3) La temperatura de entrada del sólido, es la temperatura ambiente promedio.
- 4) La humedad de la arena a la entrada, será del 25%, base húmeda.
- 5) La humedad de la arena a la salida, será del 5%, base húmeda.
- 6) se obtendrán 2.31 Kg sólido seco/hora.
- 7) El número de unidades de transferencia,  $N_{OT}$ , variará entre 1.5 y 2.5, que son los valores sugeridos como óptimos.
- 8) La temperatura de salida de los gases, es igual a la temperatura de evaporación del agua.
- 9) Se considera como flujo de masa de gas en el secador 3,143.7

$\text{Kg/h m}^2$ , que se encuentra dentro de los valores sugeridos para que no haya arrastre de polvos, (4)

III.2. CALCULO DE LA LONGITUD Y DIAMETRO DEL SECADOR:

Según los datos proporcionados por el observatorio de Tacubaya, para la Ciudad de México, se tiene:

Temperatura ambiente promedio: $t_a$	15°C
Humedad relativa promedio	60%
Presión atmosférica $p_a$	585 mm Hg

Para el caso de la mezcla aire-agua, tomando para el aire un peso molecular de 29, tendremos:

$$Y = \frac{18}{29} \frac{p_v}{p - p_v} = 0.62 \frac{p_v}{p - p_v}$$

Si el gas está saturado con vapor, se emplean las mismas ecuaciones y se substituye la presión de vapor por la tensión de vapor o presión de vapor correspondiente a la saturación .

$$t^{\circ}F \quad p_v^* (lb/p1g^2) \quad (8)$$

$$58 \quad 0.2384$$

$$60 \quad 0.2561$$

$$\text{Interpolando } p_v^* = 0.2473 \text{ lb/p1g}^2 = 12.7856 \text{ mmHg} = 12.79 \text{ mmHg.}$$

$$p_v = p_v^* \times Y ; p_v = 12.79 \times 0.6 = 7.6740 \text{ mmHg.}$$

$$Y = 0.62 \frac{7.6740 \text{ mmHg}}{(585 - 7.6740) \text{ mmHg}} = 0.0082 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}}$$

$t_2 = 80^{\circ}C$  y con  $Y = 0.0082$ , de la carta de humedad se obtiene:

$$t_w = 47.22^\circ\text{C}$$

Las humedades del sólido, referidas al sólido seco, serán:

$$X_1 = \frac{x_1}{1 - x_1} = \frac{0.25}{1 - 0.25} = 0.3333 \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg sólido seco}} \quad (\text{III.1})$$

$$X_2 = \frac{x_2}{1 - x_2} = \frac{0.05}{1 - 0.05} = 0.0526 \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg sólido seco}}$$

Puesto que  $s = 2.3183 \frac{\text{Kg sólido seco}}{\text{hora}}$ , se obtiene:

$$s = \frac{s_H}{1 + X_1}; \quad s_H = 3.0910 \frac{\text{Kg sólido húmedo}}{\text{hora}} \quad (\text{III.2})$$

La cantidad de agua evaporada, será:

$$\Delta X = s (X_1 - X_2) = 2.3183 \frac{\text{Kg sólido seco}}{\text{hora}} (0.3333 - 0.0526) \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg sólido seco}}; \quad \Delta X = 0.6507 \frac{\text{Kg. agua}}{\text{hora}} \quad (\text{III.3})$$

$$q_t = q_1 + q_2 \quad (\text{III.4})$$

$$q_1 = s \cdot (C_p)_s \cdot \Delta t = s \cdot (C_p)_s (t_w - t_{s1}) \quad (\text{III.5})$$

$$q_1 = 2.3183 \frac{\text{Kg sólido seco}}{\text{hora}} \cdot 0.21 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} (47.22 -$$

$$- 15 )^{\circ}\text{C} = 15.6861 \frac{\text{Kcal}}{\text{hora}}$$

A partir de éste momento, nuestra secuencia de cálculo será la siguiente:

1) Cálculo de la temperatura de salida de los gases:

$$e^{Nt} = \frac{t_2 - t_w}{t_1 - t_w}; e^{Nt} (t_1 - t_w) = t_2 - t_w \quad (\text{III.6})$$

$$e^{Nt} t_1 - e^{Nt} t_w = t_2 - t_w$$

$$e^{Nt} t_1 = t_2 - t_w + e^{Nt} t_w$$

Dividiendo toda la ecuación anterior por  $e^{Nt}$ , queda:

$$\frac{e^{Nt} t_1}{e^{Nt}} = \frac{t_2 - t_w + e^{Nt} t_w}{e^{Nt}}$$

De donde despejando  $t_1$ :

$$t_1 = \frac{t_2 - t_w}{e^{Nt}} + t_w \quad (\text{III.7})$$

2) Cálculo de  $q_2$  :

$$q_2 = s (X_1 - X_2) ( (t_{ev} - t_{s1}) + \lambda_{t_{ev}} + 0.45$$

$$(t_1 - t_{ev}) ).$$

(III.8)

Suponiendo  $t_{ev} = t_1$  :

$$q_2 = s ( X_1 - X_2 ) ( ( t_1 - t_{s1} ) + \lambda_{t_1} ) \quad (III.9)$$

$$q_2 = \Delta X ( ( t_1 - 15 ) + \lambda_{t_1} ) \quad (III.10)$$

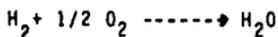
3) Cálculo de  $q_t$ :

$$q_t = q_1 + q_2$$

4) Cálculo del calor húmedo.

Se realizará mediante un balance de materia.

Reacciones:



Base 100 Kg de combustible.

Análisis inicial:

COMPOSICION	%	P. a.	Kg-Mol	O <sub>2</sub> NECESARIO Kg-Mol
-------------	---	-------	--------	------------------------------------

C	85.0	12	7.0833	7.0833
H	14.0	2	7.0	3.5
S	1.0	32	0.0313	0.0313

TABLA 1

TOTAL:

$$\% = 100$$

O<sub>2</sub> necesario = 10.6146 Kg-Mol.

El poder calorífico del diesel, es de 19,600 Btu / lb, que equivale a 10,888.8889 Kcal / Kg, de donde:

$$Q_c = 10,888.889 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} (100 \text{ Kg}) = 1,088,888.889$$

$$Q_c = 1,088.888.889 \frac{\text{Kcal}}{100 \text{ Kg de combustible}}$$

Esta cantidad de calor, es igual a la suma de los calores sensibles cedidos por cada gas:

$$Q = \alpha_{\text{CO}_2} q_{t_{s1}}^{t_1} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} q_{t_{s1}}^{t_1} + \alpha_{\text{N}_2} q_{t_{s1}}^{t_1} + x_{\text{aire}} q_{t_{s1}}^{t_1} \quad (\text{III.11})$$

$$Q = \alpha_{\text{CO}_2} q_{15}^{80} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} q_{15}^{80} + \alpha_{\text{N}_2} q_{15}^{80} + x_{\text{aire}} q_{15}^{80}$$

$$q_{15}^{80} = c_{pm}|_{80} (80 - 25) - c_{pm}|_{15} (15 - 25) \quad (\text{III.12})$$

$$\alpha_{\text{CO}_2} q_{15}^{80} = \frac{7.0833 \text{ Kg-Mol CO}_2}{100 \text{ Kg comb.}} (9.25 (80 - 25) +$$

$$+ 8.88 (25 - 15)) = 4,232.6259 \frac{\text{Kcal}}{100 \text{ Kg comb.}}$$

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}} q_{15}^{80} = \frac{7.6672 \text{ Kg-Mol H}_2\text{O}}{100 \text{ Kg comb.}} (8.08 (80 - 25) +$$

$$+ 8.02 (25 - 15)) = 4,022.7131 \frac{\text{Kcal}}{100 \text{ Kg comb}}$$

$$Q_{N_2} q_{15}^{80} = \frac{39.9311 \text{ Kg-Mol } H_2}{100 \text{ Kg comb.}} \cdot (6.97 (80 - 25) + 6.96 (25 - 15)) =$$

$$= 18,086.7918 \frac{\text{Kcal}}{100 \text{ Kg comb.}}$$

$$x_{\text{aire}} q_{15}^{80} = \frac{x \text{ Kg-Mol aire}}{100 \text{ Kg comb.}} \cdot (7 (80 - 25) + 6.97 (25 - 15)) =$$

$$= \frac{454.7 \cdot x}{100 \text{ Kg comb.}}$$

Como  $Q_c = Q$ , se obtiene:

$$1,088.888.889 \text{ Kcal} = 4,232.6259 \text{ Kcal} + 4,022.2131 \text{ Kcal} + 18,086.7918 \text{ Kcal} + 454.7 \cdot x \text{ Kcal.}$$

$$x = 2,336.8095 \frac{\text{Kg-Mol aire seco.}}{100 \text{ Kg comb.}}$$

$$2,336.8095 \frac{\text{Kg-Mol aire seco.}}{100 \text{ Kg comb.}} \cdot 0.0082 \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg aire seco}} \cdot \frac{29}{18} =$$

$$= 30.8718 \text{ Kg-Mol } H_2O.$$

$$H_2O \text{ Total} = 30.8718 + 7.6672 = 38.5390 \text{ Kg-Mol}$$

$$2,336.8095 \frac{\text{Kg-Mol aire seco.}}{100 \text{ Kg comb.}} \cdot 0.79 = 1,846.0795 \text{ Kg-Mol } N_2$$

$$2,336.8095 \frac{\text{Kg-Mol aire seco.}}{100 \text{ Kg comb.}} \cdot 0.21 = 490.73 \text{ Kg-Mol } O_2$$

Los  $10.6146 \frac{\text{Kg-Mol } O_2}{100 \text{ Kg comb.}}$ , son tomados del aire con:

$$10.6146 \frac{\text{Kg-Mol } O_2}{100 \text{ Kg comb.}} \times \frac{79 \text{ Kg-Mol } N_2}{21 \text{ Kg-Mol } O_2} = 39.9311 \frac{\text{Kg-Mol } N_2}{100 \text{ Kg comb.}}$$

$$10.6146 \frac{\text{Kg-Mol } O_2}{100 \text{ Kg comb.}} + 39.9311 \frac{\text{Kg-Mol } N_2}{100 \text{ Kg comb.}} = 50.5447 \frac{\text{Kg-Mol aire}}{100 \text{ Kg comb.}}$$

La cantidad de agua que entrará con éste aire:

$$0.0082 \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg aire seco}} \times \frac{29}{18} = 0.0132 \frac{\text{Kg-Mol } H_2O}{\text{Kg-Mol aire}}$$

$$50.5447 \frac{\text{Kg-Mol aire}}{100 \text{ Kg comb.}} \times 0.0132 \frac{\text{Kg-Mol } H_2O}{\text{Kg-Mol aire}} = 0.6672 \text{ Kg-Mol } H_2O.$$

$H_2O$  total =  $H_2O$  que entra con el aire +  $H_2O$  que se forma en la combustión.

$$H_2O \text{ total} = 0.6672 + 7.0 = 7.6672 \text{ Kg-Mol } H_2O.$$

Análisis final:

COMPOSICION	Kg-Mol	%
$CO_2$	7.0833	12.9463
$H_2O$	7.6672	14.0135
$N_2$	39.9311	72.98
$SO_2$	0.0313	0.0572
TOTAL	54.7129	100.0

TABLA 2

## Peso promedio de gases secos

COMPOSICION	Kg-Mol	%	M	peso(Kg)
CO <sub>2</sub>	7.0833	0.2971	44	13.0724
O <sub>2</sub>	490.73	20.5859	32	658.7488
N <sub>2</sub>	1,886.0076	79.1170	28	2,215.2760
TOTAL	2,383.8209	100.0		2,887.0972

TABLA 3

El peso por 1 Mol de gases, es aproximadamente 29. Considerando a los gases como si fueran aire:

$$2,383.8209 \times 29 = 69,130.8061 \frac{\text{Kg aire seco}}{100 \text{ Kg comb.}}$$

Este aire entrará con una humedad de 38.5390 Kg-Mol H<sub>2</sub>O

$$Y_1 = \frac{18 \times 38.5390}{29 \times 2,383.8209} = 0.0100 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg aire seco}}$$

$$C = 0.24 + 0.45 Y_1 = 0.24 + 0.45 ( 0.0100 ) = 0.244 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg aire seco}^\circ\text{C}}$$

5) Cálculo de  $W_g$ :

$$q_t = W_g ( C_p )_s ( t_2 - t_1 ). \quad (III.13)$$

Como  $( C_p )_s$  es C :

$$W_g = \frac{Q_t}{0.244 (80 - t_1)} \quad (\text{III.14})$$

6) Cálculo del calor necesario a los gases.

Esta cantidad de gases se debe de calentar desde la temperatura ambiente, hasta la temperatura de entrada al secador.

$$\frac{Q_I}{\theta} = W_g \times C (t_2 - t_a) = W_g \times 0.244 (80 - 15) \quad (\text{III.15})$$

$$\frac{Q_I}{\theta} = 15.9055 W_g \quad (\text{III.16})$$

7) Cálculo de la cantidad necesaria de combustible.

Para 100 Kg de combustible:

$$C = W_g \times \frac{100}{69,130.8061} = W_g \times 0.0014 \frac{\text{Kg comb.}}{\text{hora}} \quad (\text{III.17})$$

8) Cálculo del diámetro del secador:

$$d = \sqrt{\frac{W_g}{0.785 G}}$$

Para éste cálculo se supondrá  $G = 3,143.7137 \frac{\text{Kg}}{\text{h m}^2}$

9) Cálculo de  $H_{OT} = 0.0175 G^{0.84} C d$

10) Cálculo de z:

$$z = H_{OT} H_{OT}$$

$H_{OT}$	$t_1$	$\lambda t_2$	$q_2$	$q_t$	$W_g$	$d$	$H_{OT}$	$z$	$z/d$	$\frac{Q_1}{A}$	$\epsilon$
1.5	54.5342	566.1100	394.0927	409.7788	65.7595	0.1632	0.6058	0.9087	5.5680	1,045.9377	0.0967
1.6	53.8382	566.9444	394.1827	409.8688	64.0240	0.1611	0.5978	0.9564	5.9367	1,018.3337	0.0942
1.7	53.2084	567.7778	394.3152	410.0013	62.5392	0.1592	0.5908	1.0044	6.3090	994.7172	0.0920
1.8	52.6385	568.0556	394.1251	409.8112	61.2083	0.1575	0.5845	1.0521	6.6800	973.5486	0.0900
1.9	52.1229	568.3333	393.9703	409.6564	60.0534	0.1560	0.5789	1.1000	7.0513	955.1794	0.0883
2.0	51.6563	568.6111	393.8475	409.5336	59.0471	0.1547	0.5741	1.1481	7.4215	939.1736	0.0869
2.1	51.2341	568.8889	393.7536	409.4397	58.1672	0.1535	0.5698	1.1965	7.7948	925.1784	0.0856
2.2	50.8521	569.1667	393.6858	409.3719	57.3954	0.1525	0.5660	1.2452	8.1652	912.9025	0.0844
2.3	50.5065	569.4444	393.6415	409.3276	56.7166	0.1516	0.5626	1.2940	8.5356	902.1059	0.0834
2.4	50.1937	569.7222	393.6188	409.3049	56.1184	0.1508	0.5597	1.3432	8.9072	892.5912	0.0826
2.5	49.9107	570.0000	393.6154	409.3015	55.5902	0.1501	0.5570	1.3925	9.2771	884.1899	0.0818

TABLA 4

R E S U L T A D O S

En base a los datos obtenidos anteriormente, seleccionaremos el siguiente secador :

$$N_{OT} = 2.3$$

$$t_1 = 50.5065^{\circ}\text{C}$$

$$W_g = 56.7166 \frac{\text{Kg. gases secos}}{\text{hora}}$$

$$d = 0.1516 \text{ m}$$

$$z = 1.2940 \text{ m}$$

$$\frac{QT}{\theta} = 902.1059 \frac{\text{Kcal}}{\text{hora}}$$

Tomando un factor de seguridad del 20 % ,nuestro secador tendrá de dimensiones:

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

$$z = 1.5 \text{ m}$$

### III.3. CALCULO DE LA VARIACION DE VOLUMEN DE GASES QUE VA A MOVER EL VENTILADOR:

El volumen específico del gas, para las condiciones de salida de los gases será:

$$V = \left( \frac{1}{29} + \frac{Y_2}{18} \right) \frac{0.082 T_1}{P}$$

$$P = 585 \text{ mmHg} = 0.7697 \text{ atm.}$$

$$T_1 = 50.5065^{\circ}\text{C} = 323.5065^{\circ}\text{K.}$$

La humedad, será igual a la suma de la humedad a la entrada del se

-cador  $Y_1$  más un incremento de humedad igual a la cantidad de agua evaporada durante el secado.

La cantidad de agua evaporada es  $X$ , que dividida en  $W_g$  da el incremento de humedad :

$$Y = \frac{0.6507 \text{ Kg. agua.}}{\text{hora}} \div \frac{56.7166 \text{ Kg. aire seco}}{\text{hora}}$$

$$Y = 0.0115 \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg aire seco}}$$

La humedad a la salida:

$$Y_2 = 0.010 + 0.0115 = 0.0217 \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg aire seco}}$$

$$V = \left( \frac{1}{29} + \frac{0.0217}{18} \right) \frac{0.082 (323.5065)}{0.7697}$$

$$V = 1.23 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg aire seco}}$$

El volumen de gases , será:

$$V_T = W_g V \frac{1}{60} = 56.7166 \times 1.23 \times \frac{1}{60} = 1.1627 \frac{\text{m}^3}{\text{min.}} \quad (\text{III.18})$$

#### III.4. PERDIDAS POR CONVECCION:

Para aire a presión atmosférica, convección libre y flujo laminar, el coeficiente  $h$ , está dado por la ecuación:

$$h = 0.27 \left( \frac{(\Delta T)_1}{d} \right)^{1/4} \quad (17) \quad (III.19)$$

d = pies

T = °F

$$h = \frac{\text{Btu}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$\frac{Q}{A} = h \Delta T = 0.27 \left( \frac{(\Delta T)_1}{d} \right)^{1/4} \Delta T. \quad (III.20)$$

Suponiendo una diferencia entre la temperatura de pared y la temperatura ambiente de 30°F :

$$d = 6" + 2" = 8"$$

$$\frac{Q}{A} = 0.27 \left( \frac{30}{0.666} \right)^{1/4} 30 = 20.9844 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2}$$

Si tomamos como aislante lana mineral,  $k = 0.0225 \frac{\text{Btu}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$  (2)

$$\Delta x_p = \frac{0.0225 (60.4559)}{20.9844} = 0.0648 \text{ pies} \quad (III.21)$$

Para calcular la T, se toma como temperatura interna un promedio entre  $t_2$  y  $t_1$  :

$$\frac{80 + 50.5065}{2} = 65.2533^\circ\text{C} = 149.4559^\circ\text{F}$$

Como se supuso una  $(\Delta T)_1$  de 30°F:

$$(\Delta T)_1 = T_w - t_a \quad (III.22)$$

$$T_w = 30 + 59 = 89^\circ F$$

$$(\Delta T)_2 = T_{\text{interna}} - T_w = 149.4559 - 89 = 60.4559^\circ F \quad (III.23)$$

Calculando el área:

$$\text{Area} = 3.14 (0.66) (4.92) = 10.2040 \text{ pies}^2$$

Las pérdidas por convección en el secador, serán:

$$Q_T = 20.9844 (10.2040) = 214.1248 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 53.9595 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Recalculando:

$$\frac{QT}{A} = 902.1059 + 53.9595 = 956.0654 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

La cantidad de gases, será:

$$W_g = \frac{56.7166 (956.0654)}{902.1059} = 60.1091 \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{h}}$$

La variación de humedad:

$$\Delta Y = \frac{0.6507}{60.1091} = 0.0108 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}} \quad (III.24)$$

$$Y_2 = 0.0102 + 0.0108 = 0.0210 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}}$$

$$V = \left( \frac{1}{29} + \frac{0.0210}{18} \right) \frac{0.082 (323.5065)}{0.7697}$$

$$= 1.2286 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg aire seco}}$$

$$V_T = 60.1091 (1.2286) \times \frac{1}{60} = 1.2308 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

La masa velocidad:

$$G = \frac{60 \cdot 1091}{0.785 (0.15)^2} = 3,403.2045 \frac{\text{Kg}}{\text{h m}^2} = 696.9967 \frac{\text{lb}}{\text{h pie}^2}$$

### III.5.CALCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA:

$$\text{Volumen secador} = 0.785(0.15)^2(1.5) = 0.0265 \text{ m}^3$$

El % del material levantado es del 3 al 12% del volumen del secador. Suponiendo que el material levantado, corresponde al 5%:

$$\text{Material levantado} = 0.013 \text{ m}^3 = 0.0468 \text{ pies}^3$$

El número de aletas o elevadores para secadores de diámetro comercial (mayores de 2 pies de diámetro), varía de 2d a 3d. Si hacemos éste cálculo para nuestro secador, nos da 1.5 aletas, por lo que basados en un secador comercial de 2 pies de diámetro el número de aletas correspondientes sería de 6, valor correspondiente al mínimo. Por lo tanto se supone que el número de aletas en nuestro secador será igualmente de 6.

La altura de los elevadores, está en el rango del 8 al 12% del diámetro, suponiendo el 12% ;  $0.15(12\%) = 0.018 \text{ m}$ .

$$\theta = \frac{\text{Material levantado} \cdot \text{densidad}}{\text{Kg sólido seco} \cdot h}$$

$$\theta = \frac{0.0468 (100)}{5.1109} = 0.9154 \text{ h} = 54.9258 \text{ min.}$$

$$\theta = \frac{0.23 \cdot z}{S N^{0.9} d} + \frac{0.6 \cdot \beta \cdot z \cdot G}{F}$$

Suponiendo un diámetro promedio de partícula para la arena de 1,500 micras: (3)

$$B = 5 (D_p)^{-0.5} = 5 (1500)^{-0.5} = 0.1291$$

Así mismo, se supondrá una velocidad de rotación de 5 rpm.

$$z = 1.5 \text{ m} = 4.9213 \text{ pies.}$$

$$d = 0.15 \text{ m} = 0.4921 \text{ pies.}$$

$$G = 696.9967 \frac{\text{lb}}{\text{h pie}^2}$$

$$F = 5.1109 \frac{1}{5\% (3.14) \left(\frac{0.4921}{2}\right)^2} = 537.4410 \frac{\text{lb material seco}}{\text{h pie}^2 \text{secc. transv.}}$$

$$54.9258 = \frac{(0.23)(4.9213)}{5(0.9)(0.4921)} + \frac{(0.6)(0.1291)(4.9213)(696.9967)}{537.4410}$$

Despejando la pendiente:

$$S = 0.0099 \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Como la longitud del secador es de 1.5 m :

$$0.0099 \frac{\text{m}}{\text{m}} \cdot 1.5 \text{ m} = 0.0149 \text{ m.}$$

### III.6. DISEÑO DEL CICLÓN:

En el caso de nuestro secador de arena, no sería necesario el uso del ciclón, ya que éste es recomendable para diámetros de partícula mayores de 5 micras y menores de 200. (3)

Debido a que queremos que nuestro secador sea utilizado con fi-

-nes didácticos para la Escuela de Química, y pensando que en un futuro trabajará con otros materiales a secar, se supuso un material tal como el ácido acetilsalicílico, el cual tiene un diámetro promedio de partícula de 137 micras. (5)

Nuestro ciclón ( Fig.4 ), tendrá las siguientes proporciones geométricas:

$$B_c = \frac{D_c}{4}$$

$$S_c = \frac{D_c}{8}$$

$$D_e = \frac{D_c}{2}$$

$$Z_c = 2 D_c$$

$$H_c = \frac{D_c}{2}$$

$$J_c = \frac{D_c}{4}$$

$$L_c = 2 D_c$$

$$A_c = H_c \times B_c$$

Si diseñamos un ciclón para coleccionar 100% de partículas de diámetro 137 micras:

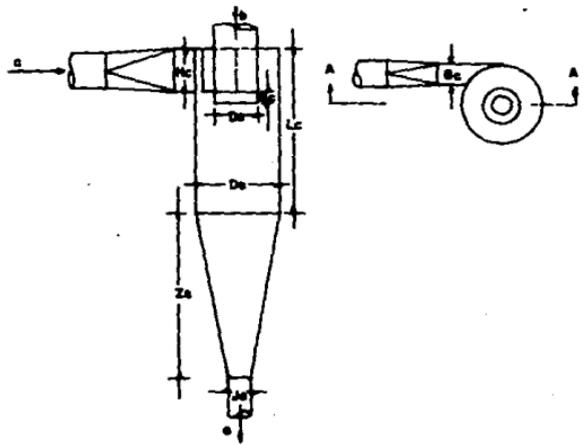
$$\frac{D}{D_{pc}} = 10 \quad D_{pc} = \frac{137}{10} = 13.7 \text{ micras} = 4.49 \times 10^{-5} \text{ pies} \quad (III.26)$$

Al ser  $D_{pc} = 13.7$  micras, quiere decir que de las partículas de éste diámetro un 50% es coleccionado. (3)

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9 A_c B_c}{2 \pi N_e V_c (\rho_s - \rho)}} \quad (III.27)$$

De ésta ecuación, se conoce  $D_{pc}$  y  $N_e$  que es igual a 5 según lo recomendado. Despejando los valores desconocidos  $B_c$  y  $V_c$  : (3)

$$\frac{B_c}{V_c} = \frac{2 \pi D_{pc}^2 N_e (\rho_s - \rho)}{9 A_c} = K \quad (III.28)$$



**FIGURA No. 4**

$$B_c = V_c K \quad (III.29)$$

Necesitamos por lo tanto otra ecuación que relacione  $B_c$  y  $V_c$  :

$$V_T = 1.2308 \frac{-m^3}{min} = 43.4605 \frac{-Pies^3}{min}$$

$$V_c = \frac{V_T}{Area} \quad (III.30)$$

El área de entrada al ciclón es igual a  $H_c \times B_c$ ; como  $H_c = D_c/2$   
y  $B_c = D_c/4$  :

$$H_c = 2B_c$$

De donde:

$$A_c = 2(B_c)^2$$

Con lo que se obtiene:

$$V_c = \frac{43.4605}{60 \times 2(B_c)^2} = \frac{0.3622}{(B_c)^2}$$

La segunda ecuación requerida sería:

$$V_c (B_c)^2 = 0.3622 \quad (III.31)$$

Como  $B_c = K V_c$  :

$$V_c K^2 V_c^2 = 0.3622$$

$$V_c^3 = \frac{0.3622}{K^2} \quad (III.32)$$

A continuación, se calcula el valor de la viscosidad del aire a  
 $t_1 = 50.5065^\circ C$ :

$$\mu = 0.019 \text{ cp} = 1.2768 \times 10^{-5} \frac{\text{lb}}{\text{pie sg}} \quad (1)$$

La densidad del ácido acetilsalicílico es de  $0.68 \frac{\text{Kg}}{\text{Lt}} = 42.4550$   
 $\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$  (5)

$$V = 1.2286 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg aire seco}} = 19.6784 \frac{\text{pies}^3}{\text{lb}}$$

$$Y_2 = 0.0210 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb aire seco}}$$

Una libra de aire seco mas la humedad que contenga, ocupa un volumen de  $19.6784 \text{ pies}^3/\text{lb}$ , quedando: una libra de aire seco mas  $0.0210$  lb de agua que contiene, ocupan un volumen de  $19.6784 \text{ pies}^3$ , de donde:

$$\rho = \frac{1.0210}{19.6784} = 0.0519 \frac{\text{lb}}{\text{pies}^3} \quad (111.33)$$

$$\frac{B_c}{V_c} = \frac{2 \left( 4.49 \times 10^{-5} \right)^2 (5) (42.4550 - 0.0519)}{9 (1.27 \times 10^{-5})} = 0.0234$$

$$B_c = 0.0234 V_c$$

$$V_c^3 = \frac{0.3622}{K^2} = \frac{0.3622}{(0.0234)^2} = 661.48$$

$$V_c = 8.7131 \frac{\text{pies}}{\text{Sg}}$$

Con todos los valores obtenidos anteriormente, podemos calcular las dimensiones geométricas de nuestro ciclón:

$$B_c = 0.0234(8.7131) = 0.2039 \text{ pies} = 0.0621 \text{ m.}$$

$$D_e = 0.1243 \text{ m}$$

$$H_c = 0.1243 \text{ m}$$

$$L_c = 0.4972 \text{ m}$$

$$S_c = 0.0311 \text{ m}$$

$$Z_c = 0.4972 \text{ m}$$

$$J_c = 0.0621 \text{ m}$$

$$A_c = 0.0077 \text{ m}^2$$

Las pérdidas de presión por fricción en el ciclón, se expresan como el número de veces la velocidad presión  $h_{vf}$  de entrada en pulgadas de agua, y es una medida directa de la presión estática y potencia que debe de desarrollar el ventilador.

Suponiendo una pérdida por fricción  $F_{cv} = 8(3)$ :

$$h_{vf} = 0.003 V_c^3 = 0.003(0.0519)(8.7131)^2 \quad (III.34)$$

$$h_{vf} = 0.0118 \text{ pulgadas de agua}$$

$$\text{Presión estática} = F_{cv} h_{vf} = 8(0.0118) = 0.094 \text{ pulg. de agua (III.35)}$$

Se supone que la caída de presión en el ciclón, representa del 50 al 90% de la caída de presión en todo el equipo, por lo que:

Suponiendo el 90%:

$$\text{Caída de presión en el equipo} = 0.1786 \text{ Pulgadas de agua.}$$

III.7. PLANOS







CAPITULO IV

ESTIMACION DE COSTO

CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO TOTAL
01 MATERIAL				
001 ANGULO DE ACERO AL CARBON.(BASTIDOR)	24 metros	Tramo de 6 metros	3,676.5	22,059.00
002 LAMINA DE ACERO AL CARBON N°20.(ELEVADORES)	1	Pieza	3,795.00	3,795.00
003 LAMINA DE ACERO AL CARBON N°18.(2 CINCHOS Y 1 PIEZA DE ALIMENTACION)	1	Pieza	5,062.00	5,062.00
004 LAMINA NEGRA N°11.(CILINDRO INTERIOR CAMARA DE COMBUSTION)	1	Pieza	10,124.00	10,124.00
005 LAMINA GALVANIZADA N°22 (CILINDRO EXTERIOR CAMARA DE COMBUSTION)	1	Pieza	4,335.00	4,335.00.
006 LAMINA DE ACERO INOXIDABLE N°16 TIPO T-304(1 CANAL DE ALIMENTACION, 2 TOLVAS, CICLON , DUCTERIA.)	2	Piezas	76,470.00	152,940.00

007	LLANTA DE FIERRO FUNDIDO	2	Piezas	3,000.00	6,000.00
008	JUNTA DE HULE NEGRO.(NEO PRENO)	1	Pieza	500.00	500.00
009	CARRETILLAS NO REFORZA- DAS.(DE HULE)	4	Piezas	1,500.00	6,000.00
010	AISLAMIENTO LANA MINERAL (HOJAS DE 3X2X8)	1	Pieza	6,500.00	6,500.00
011	TUBO DE VIDRIO.(MARCA SCHOTT FAB.ALEMANA,PYREX,DE 15 CM DE DIAMETRO Y 1.5 M DE LONGITUD, CORTADO EN LOS EXTREMOS,PARED GRUESA=7 mm,T <sup>a</sup> MAX.=500°C.T <sup>a</sup> OPTIMA DE TRABAJO=200°C) (CILINDRO DEL SECADOR)	1	Pieza	86,500.00	86,500.00
012	INDICADOR DE TEMPERATURA (MARCA PIFUTRONIC,CON SELEC TOR DE DOCE PUNTOS MARCA OME GA)	1	Juego	520,000.00	520,000.00
013	TERMOPARES.(HABILITACION IN- DUSTRIAL).(COMPLEMENTO 012)	2	Piezas	20,000.00	40,000.00

014	MOTOR CORRIENTE DIRECTA, 1/4 H.P. (90 VOLTS DE C/D EN ARRIADURA, 100 VOLTS C/D EN CAMPO, ARMAZON TOTAL MENTE CERRADO. MARCA BALDOR. MODE- LO CD-3425)	1	Pieza	143,000.00	143,000.00
015	CONTROL DE VELOCIDAD. (ENTRADA DE 127 VOLTS DE CORRIENTE ALTERNA, SALIDA DE 90 VOLTS DE C/D VARIA BLES y 100 VOLTS DE C/D EN CAM- PO. MARCA COVESA. MODELO C)	1	Pieza	88,000.00	88,000.00
016	TRANSMISION. (COMPRENDE CATARINA MOTRIZ, CATARINA ACCIONADA, CADE- NA DE RODILLOS)	1	Juego	50,000.00	50,000.00
017	VENTILADOR. (MOTOR 1/100 H.P., 2 POLOS, 1/8 TAMARO DE FLECHA, 3,000 RPM; ASPAS: 4 HOJAS DE 4". MARCA MC. MILLAN)	1	Juego	3,754.00	3,754.00
018	QUEMADOR DE DIESEL. (CONSTA DE BOMBA DE 6 GALONES, ELECTRODOS, TRANS	1	Juego	105,000.00	105,000.00

-FORMADOR, VALVULA SOLENOIDE, TATEL  
 COMPLETO. 1,461.6 KCAL/H AL 70% DE  
 OPERACION. MARCA TERMOMAC)

019	CABLE N°12	20	Metros	30.00	600.00
020	TUBO CONDUIT. (1/2" PARED DELGADA) (3 METROS)	1	Pieza	1,700.00	1,700.00
021	INTERRUPTOR DE CUCHILLAS. (2 POLOS X 15 AMPERES)	1	Pieza	1,800.00	1,800.00
022	TUBERIA DE FIERRO NEGRO. (CED.40 1/2" DIAMETRO)	1	Tramo de 6 metros.	2,845.00	2,845.00
023	VALVULA DE COMPUERTA (1/2")	1	Pieza	3,498.00	3,498.00

TOTAL MATERIALES

1,264,012.00

02 MANO DE OBRA

001	MATERIAL NO ROLADO. (SE CONSIDERO EL 100% DEL COSTO DEL MATERIAL)	1	Lote		253,299.00
002	MATERIAL ROLADO. (SE CONSIDERO EL 200% DEL COSTO DEL MATERIAL)	1	Lote		28,918.00

TOTAL MANO DE OBRA

282,217.00

TOTAL

1,546,229.00

EL PRECIO DEL MATERIAL, NO INCLUYE I.V.A.

CAPITULO V

PRACTICAS PROPUESTAS

PRACTICA N°1:

Titulo: Mediciones de temperaturas y balance de materia en un secador rotatorio.

Objetivo: El alumno observará el proceso de secado y planteará un balance de materia en un secador rotatorio.

Procedimiento:

- 1) Se humedece la arena.
- 2) Se pesa la charola vacía en la cual se recolectará la arena seca.
- 3) Con una pequeña muestra de arena húmeda y la balanza de humedad, se obtiene la humedad de entrada del sólido.
- 4) Con un psicrómetro se mide la humedad del aire a la entrada.
- 5) Se prende el quemador. Se pone a funcionar el ventilador y a girar el secador.
- 6) Se alimenta la arena húmeda en forma constante, evitando que se apelmace a la entrada.
- 7) Una vez que la arena salga en forma constante, se recoge en la charola durante una hora y se vuelve a pesar llena.
- 8) Se mide la humedad de salida del aire, introduciendo el psicrómetro en la chimenea del ventilador, así como su gasto volumétrico mediante un venturí, leyendo la diferencia de alturas en el manómetro en U.
- 9) Se toma una muestra de los sólidos secos y se obtiene su humedad por medio de la balanza de humedad.
- 10) Se deja de alimentar la arena. Se mantiene trabajando el secador hasta que todo el sólido haya salido del mismo.
- 11) Se apaga el quemador, el ventilador y el secador.

Questionario:

- 1) Cual es la humedad de la arena que entra?
- 2) Cuales son las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire que entra?
- 3) Cuales son las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire que sale?
- 4) Cual es la diferencia de alturas en el manómetro en U del venturí?
- 5) Cual es la humedad final de la arena?
- 6) Cual es el peso de la charola vacía?
- 7) Cual es el peso de la charola después de que cae arena durante 1 hora?
- 8) Mediante un balance de materia, calcule cual es el gasto másico de sólidos secos y compare con lo observado en la práctica.

PRACTICA N°2:

Titulo: Cálculo del número de unidades de transferencia en un secador rotatorio.

Objetivo: El alumno observará el funcionamiento de un secador rotatorio al secar un sólido granular y calculará teórica y experimentalmente el número de unidades de transferencia, analizando las diferencias entre el valor teórico y el experimental.

Procedimiento:

- 1) Se humedece la arena.
- 2) Se enciende el quemador.
- 3) Se arranca el ventilador y el secador.
- 4) Se alimenta la arena húmeda en forma constante.

- 5) Se mantiene trabajando el equipo de ésta forma, hasta que alcance condiciones de régimen permanente y entonces se registran las mediciones.
- 6) Una vez hecho ésto, se deja de alimentar la arena. Se mantiene trabajando el secador hasta que todo el sólido haya salido del mismo.
- 7) Se apaga el quemador, el ventilador y el secador.

Questionario:

- 1) Cual es la temperatura del aire a la entrada y a la salida del secador?
- 2) Cual es la temperatura del sólido a la entrada y a la salida del secador?
- 3) Cual es la caída de presión en el medidor venturi?
- 4) Cual es la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire a la salida del venturi?
- 5) Calcule el número de unidades de transferencia, tanto el teórico como el experimental.
- 6) Compare los dos valores obtenidos anteriormente.
- 7) Analice las posibles diferencias del punto anterior.

Para ambas prácticas, ver el esquema representado en la figura 5.

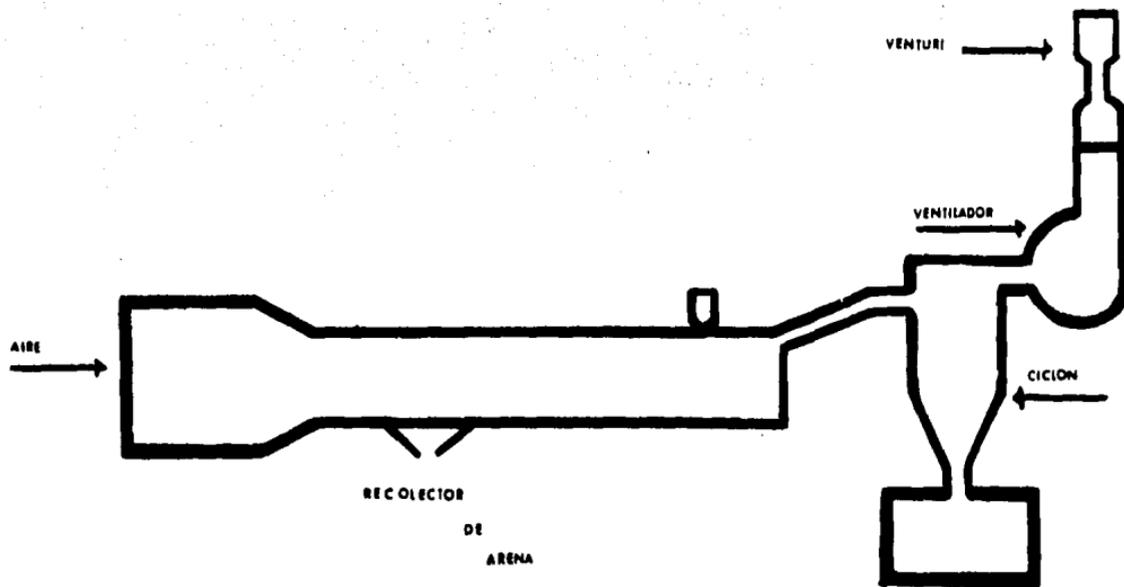


Figura 5

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

El secado, es una de las operaciones más frecuentes en los procesos industriales, por lo que su estudio es un aspecto importante e indispensable en la formación de un Ingeniero Químico. De lo anterior se desprende la conveniencia de poder contar con un equipo de laboratorio de ésta naturaleza que permita al alumno comprobar lo aprendido en el plano teórico, así como el empezar a tomar contacto con los equipos y procesos que en un futuro encontrará en la industria.

Los equipos comerciales más pequeños resultan grandes para laboratorio y presentan un alto costo de operación y adquisición.

El diseño aquí propuesto, ofrece una gran flexibilidad debido a que podrá trabajar con diferentes materiales y condiciones de operación, lo cual representa ventajas con respecto a los secadores industriales. Si a esto le sumamos que el cilindro del secador es de vidrio, permitirá que los alumnos observen el funcionamiento del mismo, así como su manejo, lo cual desde el punto de vista didáctico es muy importante.

El costo del equipo, puede ser reducido sensiblemente, utilizando termómetros y termopozos, en lugar del medidor y control de temperatura multipunto, lo cual representaría una reducción de una tercera parte del costo final.

Por todo lo anteriormente expuesto, se recomienda la construcción de éste equipo, ya que sería una herramienta importante para la formación de los futuros Ingenieros Químicos de la Universidad La Salle y porque éste diseño, representa una gran ventaja frente a los adquiridos comercialmente.

BIBLIOGRAFIA

- 1 .- J.Ocon García y G.Tojo Barreiro.  
Problemas de Ingeniería Química.  
Aguilar S.A. de Ediciones.  
3a.Edición.  
Madrid 1980.(España)
  
- 2 .- A.S.Frust/L.A. Wenzel/C.W. Clump/Louis Maus/L.B. Andersen.  
Principios de operaciones unitarias.  
Compañía Editorial Continental (C.E.C.S.A.)  
13a.Impresión.  
México D.F.1980.(México)
  
- 3 .- R.H.Perry/Cecil H.Chilton.  
Chemical Engineers' Handbook.  
Mc.Graw Hill Book Company.  
5a.Edición.  
New York.1973.(U.S.A.)
  
- 4 .- Robert C.Treybal.  
Operaciones de transferencia de masa.  
Mc.Graw Hill.  
2a.Edición.  
México D.F.1980.(México)
  
- 5 .- Ramón Pagés López.  
Estudio del secado de ácido acetilsalicílico en un secador ro-  
tatorio.

Universidad Iberoamericana.  
México D.F.1972.(México)

- 6 .- W.L.Badger/J.T. Banchemo.  
Introducción a la Ingeniería Química.  
Mc.Graw Hill.  
1a.Edición.  
México D.F.1984.(México)
- 7 .- Friedman S.J./W.R. Marshall.  
Eng.Progr.,45,482 573.  
1949(U.S.A.)
- 8 .- David H.Himmelblau.  
Principios y cálculos básicos de la Ingeniería Química.  
Compañía Editorial Continental(C.E.C.S.A.).  
1a.Edición.  
México D.F.1977.(México)
- 9 .- Mc.Cabe/Smith.  
Operaciones básicas de Ingeniería Química.  
Reverté S.A.  
4a.Impresión.  
Barcelona.1978.(España)
- 10.- Key R.B.  
Drying principles and practice.

Pergamon.

New York 1972(U.S.A.)

- 11 .- The Trane Company La Crosse Wisconsin.  
Trane Air Conditioning Manual.  
Mc.Gill/Jensen Inc.  
St Paul, Minn. 1981(U.S.A.)
- 12 .- International Research Council and The National Academy of  
Sciences.  
International Critical Tables of Numerical Data.  
Mc.Graw Hill Book Company.  
New York. 1929(U.S.A.)
- 13 .- Plueg Hagen Federica.  
Diseño y pruebas de operación de un secador rotatorio de fi-  
nes académicos.  
Universidad Iberoamericana.  
México D.F. 1967(México)
- 14 .- Littlejohn/Heenaghan.  
Introducción a la Ingeniería Química.  
Compañía Editorial Continental S.A.(C.E.C.S.A.)  
3a. Impresión.  
México D.F. 1970(México)
- 15 .- Charles M.Thatcher.

Fundamentos de Ingeniería Química.  
Compañía Editorial Continental(C.E.C.S.A.)  
1a. Edición.  
México D.F.1965(México)

16 .- Donald Q. Kern.

Procesos de transferencia de calor.  
Compañía Editorial Continental(C.E.C.S.A.)  
7a. Impresión.  
México D.F.1973(México)

17 .- Mc. Adams, W.H.

Heat transmission  
Mc Graw Hill Book Company  
3a. Edición  
New York 1954(U.S.A.)

NOMENCLATURA

- A Area de la superficie expuesta. ( $m^2$ )
- $A_c$  Area de entrada de gases al ciclón. ( $m^2$ )
- $A_n$  Area de sección normal del secador. ( $m^2$ )
- Bc Medida del ciclón. (m)
- C Calor específico del gas húmedo. (Kcal/Kg aire seco °C)
- C Cantidad de combustible. (Kg/h)
- $(C_p)_g$  Calor específico del gas. (Kcal/Kg °C)
- $(C_p)_s$  Calor específico del sólido. (Kcal/Kg °C)
- $(C_p)_v$  Calor específico del vapor. (Kcal/Kg °C)
- d Diámetro del secador. (m)
- Dc Medida del ciclón. (m)
- De Medida del ciclón. (m)
- $D_p$  Diámetro promedio de partícula. (micras)
- $D_{pc}$  Diámetro de partícula del cual 50% es colectado. (micras)
- dt' Disminución de temperatura del gas. (°C)
- F Velocidad de alimentación al secador. (lb material seco/h pie<sup>2</sup> de sección transversal)
- $F_{cv}$  Pérdida por fricción en el ciclón expresada como número de veces  $h_{vt}$ . (Adim.)
- G Flujo de masa de gas. (Kg/h  $m^2$ )
- Hc Medida del ciclón. (m)
- $h_c$  Coeficiente de convección líquido-gas. (Kcal/ $m^2$ h °C)
- $h_{nt}$  Altura del elemento de transmisión
- $h_{vt}$  Velocidad presión de entrada al ciclón. (pulgadas de agua)
- i Entalpía específica del aire. (Kcal/Kg)

Jc	Medida del ciclón.(m)
K <sub>g</sub>	Coefficiente de transporte de materia,tomando como potencial de difusión la presión de vapor.(Kg mol/m <sup>2</sup> )
K <sub>v</sub>	Coefficiente de transporte de materia,tomando como potencial de difusión la saturación absoluta.(Kg mol/m <sup>2</sup> )
Lc	Medida del ciclón.(m)
M <sub>g</sub>	Masa molecular del gas.
M <sub>v</sub>	Masa molecular del vapor.
N	Velocidad de rotación.(rpm)
Ne	Medida aproximada de la efectividad del ciclón.(Adim.)
n <sub>g</sub>	Moles de gas.
N <sub>QT</sub>	Número de elementos de transmisión.(Adim.)
Nt	Número de elementos de transmisión.(Adim.)
n <sub>t</sub>	Moles totales.
n <sub>v</sub>	Moles de vapor.
P	Presión total ejercida por la mezcla.(mm Hg)
P <sub>a</sub>	Presión atmosférica.(mm Hg)
P <sub>g</sub>	Presión parcial del gas.(mm Hg)
P <sub>v</sub>	Presión parcial del vapor.(mm Hg)
P <sub>v</sub> <sup>o</sup>	Presión de vapor.(mm Hg)
P <sub>w</sub> <sup>o</sup>	Presión de vapor del líquido a la temperatura húmeda.(mm Hg)
q <sub>1</sub>	Calor al material sólido seco.(Kcal/h)
q <sub>2</sub>	Calor sensible más calor latente al agua contenida en el sólido.(Kcal/h)

- $Q_c$  Calor proporcionado por el combustible. (Kcal/100 Kg)
- $q_t$  Calor total al material húmedo. (Kcal/h)
- $\frac{QT}{\theta}$  Calor necesario a los gases. (Kcal/h)
- $q_{t_{s1}}^{t_1}$  Calor medio molar proporcionado por cada gas, desde  $t_1$  a  $t_{s1}$ .  
(Kcal/mol)
- R Constante de los gases. (L atm/°Mol)
- S Pendiente del secador. (m/m)
- s Peso de sólido seco. (Kg)
- Sc Medida del ciclón. (m)
- $s_H$  Peso de sólido húmedo. (kg)
- T Temperatura. (°K)
- t Temperatura final de la masa gaseosa. (°C)
- $t_1$  Temperatura final del gas. (°C)
- $t_2$  Temperatura inicial del gas. (°C)
- $t_a$  Temperatura ambiente promedio. (°C)
- $t_{ev}$  Temperatura de evaporación. (°C)
- $t_0$  Temperatura inicial de la masa gaseosa. (°C)
- $t_s$  Temperatura de saturación adiabática. (°C)
- $t_{s1}$  Temperatura inicial del sólido. (°C)
- $t_{s2}$  Temperatura final del sólido. (°C)
- $t_w$  Temperatura húmeda. (°C)
- $U_a$  Coeficiente volumétrico de transferencia de calor. (Kcal/hm<sup>3</sup> °C)
- $v$  Volumen específico. (m<sup>3</sup>/Kg aire seco)

$V_C$	Velocidad media de entrada al ciclón, basada en el área $A_c$ . (pie/s)
$V_T$	Volumen de gases. ( $m^3/min.$ )
$W$	Velocidad de secado. ( $Kg/hm^2$ )
$w_C$	Velocidad crítica de secado. ( $Kg/hm^2$ )
$w_f$	Velocidad final de secado. ( $Kg/hm^2$ )
$w_g$	Velocidad másica del aire. ( $Kg$ gases secos/h)
$w_i$	Velocidad inicial de secado. ( $Kg/hm^2$ )
$X$	Humedad del sólido. ( $Kg$ agua/ $Kg$ sólido seco)
$x_1$	Humedad inicial del sólido (base húmeda). ( $Kg$ agua/ $Kg$ sólido húmedo)
$x_2$	Humedad final del sólido (base húmeda). ( $Kg$ agua/ $Kg$ sólido húmedo)
$X^*$	Humedad de equilibrio. ( $Kg$ agua/ $Kg$ sólido seco)
$X_C$	Humedad crítica. ( $Kg$ agua/ $Kg$ sólido seco)
$X_f$	Humedad final del sólido. ( $Kg$ agua/ $Kg$ sólido seco)
$X_i$	Humedad inicial del sólido. ( $Kg$ agua/ $Kg$ sólido seco)
$Y$	Humedad absoluta o saturación absoluta. ( $Kg$ agua/ $Kg$ aire seco)
$y$	Fración molar del vapor. (Mol vapor/Mol mezcla)
$y_1$	Humedad final del gas. ( $Kg$ agua/ $Kg$ aire seco)
$y_2$	Humedad inicial del gas. ( $Kg$ agua/ $Kg$ aire seco)
$Y^*$	Humedad de la masa gaseosa si estuviera saturada. ( $Kg$ agua/ $Kg$ aire seco)
$Y_m$	Humedad molar o saturación molar. ( $Kg$ mol agua/ $Kg$ mol aire seco)

$Y_s$	Humedad de saturación a la temperatura de saturación adiabática. (Kg/Kg)
$Y_w$	Humedad absoluta de saturación a la temperatura húmeda. (Kg/Kg)
$z$	Longitud del secador. (m)
$Z_c$	Medida del ciclón. (m)
$q$	Kg mol/100 Kg de combustible.
$\theta$	Tiempo de secado. (h)
$\theta_a$	Tiempo de secado en el periodo antecrítico. (h)
$\theta_p$	Tiempo de secado en el periodo poscrítico. (h)
$\lambda_0$	Calor latente de vaporización del vapor. (Kcal/Kg)
$\lambda_s$	Calor latente de vaporización del líquido a la temperatura de saturación adiabática. (Kcal/Kg)
$\lambda_{t_{ev}}$	Calor latente a la temperatura de evaporación. (Kcal/Kg agua)
$\lambda_w$	Calor latente de vaporización del líquido a la temperatura húmeda. (Kcal/Kg)
$\mu$	Viscosidad del aire. (Lb/pie s)
$\rho$	Densidad del aire. (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	Densidad del sólido. (Kg/m <sup>3</sup> )
$\varphi$	Humedad relativa o saturación relativa. (Adim.)
$\varphi_p$	Humedad porcentual o saturación porcentual. (Adim.)