

Procesos
de
Separación

Procesos
de
Separación

I

I

Prácticas de Laboratorio

Prácticas de Laboratorio

Laboratorio
de Ingeniería Química
UNAM

Laboratorio
de Ingeniería Química
UNAM

Facultad de Química



Facultad de Química
UNAM

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN AL CURSO EXPERIMENTAL DE PROCESOS DE SEPARACIÓN

Experimento 1.
MOLIENDA Y TAMIZADO

Experimento 2.
FILTRACIÓN

Experimento 3.
CENTRIFUGACIÓN

Experimento 4.
TORRE DE PARED MOJADA

Experimento 5.
CURVA DE INUNDACIÓN

Experimento 6.
ABSORCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO

Apéndices

INTRODUCCIÓN

.....

GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE SEPARACIÓN

Frecuentemente en la industria es necesario separar los componentes de una mezcla en fracciones individuales. Las fracciones pueden diferenciarse entre sí por el tamaño de las partículas, por su estado, o por su composición química.

Así, por ejemplo, un producto bruto puede purificarse por eliminación de las impurezas que lo contaminan, una mezcla de mas de dos componentes, puede separarse en los componentes puros individuales, la corriente que sale de un proceso puede constar de una mezcla del producto y de material no convertido, y es preciso separar y recircular la parte no convertida a la zona de reacción para convertirla de nuevo; también una sustancia valiosa, tal como un material metálico, disperso en un material inerte, es preciso liberarlo con el fin de proceder a su beneficio y desechar el material inerte.

Se han desarrollado un gran numero de métodos para realizar tales separaciones y algunas operaciones básicas se dedican a ello. En la realidad se presentan muchos problemas de separación y el ingeniero debe de elegir el método más conveniente en cada caso.

Los métodos para separar los componentes de las mezclas son de dos tipos:

Métodos de separación por difusión

Este grupo de operaciones para la separación de los componentes de mezclas, que se basan en la transferencia de material desde una fase homogénea a otra, utilizan diferencias de presión de vapor o de solubilidad. La fuerza impulsora de la transferencia es una diferencia o gradiente de concentración, de la misma forma que una diferencia o gradiente de temperatura, constituye la fuerza impulsora de la transferencia de calor.

a) Destilación

El objetivo de la destilación es separar, mediante vaporización, una mezcla líquida de sustancias miscibles y volátiles en sus componentes individuales, o en algunos casos en grupo de componentes.

Ejemplos de la destilación son la separación de mezclas como alcohol y agua en sus componentes; el aire líquido en nitrógeno, oxígeno y argón; y un crudo de petróleo en gasolina, keroseno, fuel-oil y aceites lubricantes.

b) Absorción de Gases

Un vapor soluble contenido en una mezcla con un gas inerte, es absorbido mediante un líquido en el que el soluto gaseoso es más o menos soluble.

Un ejemplo típico lo constituye el lavado mediante agua líquida, del amoníaco contenido en una mezcla amoníaco-aire. El soluto se recupera posteriormente del líquido mediante destilación y el líquido de absorción se puede reutilizar o desechar.

c) Deshumidificación

La fase líquida es una sustancia pura que está constituida por el componente que se separa de la corriente gaseosa, o sea, que el disolvente y el soluto son la misma sustancia. Con frecuencia el gas inerte o vapor es prácticamente insoluble en el líquido.

La separación de vapor de agua del aire por condensación sobre una superficie fría, y la condensación de un vapor orgánico, tal como el tetracloruro de carbono, contenido en una corriente de nitrógeno, son ejemplos de deshumidificación. En las operaciones de deshumidificación el sentido de la transferencia es desde la fase gaseosa al líquido y se entiende como un caso particular de absorción de gases.

d) Extracción líquido-líquido

Llamada también extracción con disolvente, en la que se trata una mezcla líquida con un disolvente que disuelve preferentemente a uno o más componentes de la mezcla. La mezcla tratada en esta forma se llama refinado y la fase rica en disolvente recibe el nombre de extracto.

El componente que se transmite desde el refinado hacia el extracto es el soluto, y el componente que queda en el refinado es el diluyente.

e) Extracción de sólidos o lixiviación

El material soluble contenido en una mezcla con un sólido inerte se diluye en un disolvente líquido. El material disuelto o soluto se puede recuperar posteriormente por evaporación o cristalización.

f) Cristalización

Mediante la formación de cristales se separa un soluto de una solución líquida dejando generalmente las impurezas en la masa fundida o en las aguas madres. Este método se utiliza para obtener cristales de alta pureza formados por partículas de tamaño uniforme y aspecto atractivo.

Métodos de separación mecánicos

La separación mecánica se puede aplicar a mezclas heterogéneas. Las técnicas se basan en diferencias físicas entre las partículas, tales como el tamaño, la forma o la densidad.

Se aplican para separar líquidos de líquidos, sólidos de gases, líquidos de gases, sólidos de sólidos y sólidos de líquidos.

Existen procesos especiales donde se utilizan otros métodos que no se estudiarán aquí. Estos métodos especiales se basan en las diferencias entre la facilidad de mojado o en las propiedades eléctricas, o magnéticas de las sustancias.

a) Tamizado

El tamizado es un método de separación de partículas que se basa solamente en la diferencia de tamaño. En el tamizado industrial se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz, que deja pasar las partículas pequeñas, o “ finos “, y retiene las de tamaños superiores, o “rechazos “. Un tamiz puede efectuar solamente una separación en dos fracciones. Estas fracciones se llaman fracciones de tamaño no especificado, porque aunque se conoce el límite superior o inferior del tamaño de las partículas que contiene, se desconoce su tamaño real.

b) Filtración

La filtración es la separación de partículas sólidas contenidas en un fluido, pasándolo a través de un medio filtrante, sobre el que se depositan los sólidos. La filtración industrial va desde el simple colado hasta separaciones más complejas. El fluido puede ser un líquido o un gas; las partículas sólidas pueden ser gruesas o finas, rígidas o flexibles, redondas o alargadas, separadas o agregados. La suspensión de alimentación puede llevar una fracción elevada o muy baja 40-5% en volumen de sólidos.

c) Procesos de sedimentación por gravedad

Separación de sólidos contenidos en gases y líquidos. Por ejemplo, las partículas de polvo pueden retirarse de los gases por una gran variedad de métodos. Para partículas sólidas gruesas, mayores de unas 325 micras, es útil una cámara de sedimentación por gravedad. El aparato es una gran caja, donde en uno de sus extremos entra aire cargado de polvo y por el otro sale el aire clarificado. En ausencia de corrientes de aire, las partículas sedimentan en el fondo por gravedad. Si el aire permanece en la cámara durante un período de tiempo suficiente, las partículas alcanzan el fondo de la cámara, de donde se pueden retirar posteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

- a) Foust, Wenzel
Principios de Operaciones Unitarias
John Wiley and Sons
1990.
- b) Perry
Chemical Engineer Handbook
McGraw-Hill Comp. New York
- c) McCabe and Smith
Unit Operations of chemical Engineering
McGraw-Hill
1998.
- d) Peters
Operaciones Básicas de Ingeniería Química
Barcelona
1999.

Experimento 1.
MOLIENDA Y TAMIZADO
.....

1. OBJETIVOS

- a) Moler un sólido en dos tipos de molinos.
- b) Determinar por tamizado el diámetro promedio de las partículas obtenidas en los equipos operados a diferentes condiciones de operación.
- c) Determinar la capacidad y el costo de operación de cada equipo de molienda y seleccionar el adecuado según el tamaño de partícula deseado.

2. TEORÍA BÁSICA

Importancia de la reducción de tamaño

La importancia de la operación de reducción de tamaño o desintegración de trozos, gránulos de partículas, no consiste solamente en obtener pedazos pequeños a partir de los grandes, sino que también se persigue tener un producto que posea determinado tamaño granular comprendido entre límites pre-establecidos; porque se da el caso que un sólido con un intervalo de tamaño satisfactorio para una operación determinada, puede resultar inconveniente para otra operación, aunque se trate de la misma substancia; por ejemplo: El carbón pulverizado se aplica en la calefacción de hornos industriales con quemadores especiales y el carbón en trozos se usa en los hogares que llevan atizadores mecánicos en los cuales no se puede usar carbón pulverizado, ni los hornos se pueden llenar de carbón en trozo.

Si la velocidad de reacción en la mayoría de las reacciones sobre partículas sólidas es directamente proporcional al área de contacto entre fases; la reducción de tamaño se lleva a cabo principalmente para aumentar esta área. Entre las operaciones en las cuales la reducción de tamaño es importante, se tienen:

- a) Lixiviación, donde no sólo se aumenta la velocidad de extracción con la reducción de tamaño y aumenta el área de contacto entre solvente y sólido, sino que también se reduce la distancia que el solvente tiene que penetrar en la partícula para llegar a las bolsas más remotas del soluto.
- b) Secado de sólidos porosos, donde la reducción de tamaño causa un aumento del área y una reducción de la distancia que la humedad debe viajar dentro de la partícula para alcanzar la superficie.
- c) Dispersión de un sólido en un líquido o en otro sólido molido, propiedad aprovechada en la Industria de los colorantes, alimenticia y plásticos reforzados.
- d) La reducción es importante en la industria de los minerales, la de los fertilizantes y la de los fosfatos, etc.

Dependiendo de la industria de que se trate, será el tipo de molino que use de acuerdo a sus necesidades de reducción de tamaño. En base a ésto, para seleccionar la maquinaria para molienda se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- 1) Propiedades físicas del material.
- 2) Tamaño de la alimentación.
- 3) Tamaño del producto a obtener.
- 4) Tonelaje que se debe moler.

De acuerdo con el tamaño de la alimentación y del producto, la maquinaria de molienda queda dividida en la siguiente forma:

- 1) Reducción de tamaño primaria, con alimentación de piezas de 5 a 250 cm o más.
- 2) Reducción intermedia o secundaria de tamaño, con alimentación de 2 a 8 cm y producto que pasa a través de malla 10.
- 3) Reducción fina de tamaño, con alimentación de 0.5 a 1.5 cm y producto que pasa a través de malla 200.

- 4) Reducción superfina de tamaño, con alimentación de partículas de malla 80 y con producto fino de hasta media micra.

Dependiendo del tipo de fuerza que se aplica para desintegrar las partículas, las máquinas de molienda pueden clasificarse así:

- 1) Las que quiebran por aplicación de presión continua, ejemplo: Quebrantadores de mandíbula, de disco, giratorios.
- 2) Las que desintegran por impacto o golpe, ejemplo: Molino de bolas, de martillos.
- 3) Las que desintegran por abrasión o que muelen por fuerza cortante, ejemplo: Molino de dientes, de discos.

Para la reducción primaria de tamaño y dependiendo si los materiales son duros o blandos, se tienen los siguientes tipos de molinos. Para materiales duros: Los quebradores de mandíbula, giratorios y de discos. Para materiales blandos, donde la producción de finos es limitada, se tiene el molino de martillos y el de rodillos dentados.

Determinación del tamaño de las partículas

El tamaño de una partícula puede expresarse de diferentes formas:

- a) Si la partícula es esférica el valor representativo podrá ser su diámetro, su área proyectada sobre un plano, su volumen a la superficie total de la partícula.
- b) Si la partícula es cúbica el valor representativo de su tamaño puede ser la longitud del lado del área proyectada, el volumen o la superficie total del cubo.

Hay diversos métodos para medir el tamaño de las partículas, cuyos resultados dependen de la diferencia o intervalos de los tamaños, de sus propiedades físicas y de las características permitidas de desecación o humedad, por ejemplo:

- 1) Métodos basados en la velocidad de sedimentación de las partículas en un medio viscoso, relacionando la caída de la partícula con el empuje que ésta sufre debido a la acción del medio.

- 2) Para partículas muy pequeñas del orden de micras, la muestra puede examinarse con el microscopio o con un micrómetro de retícula.
- 3) La elutriación, este método se basa también en la velocidad de sedimentación de la partícula.
- 4) Centrifugación, para partículas de diámetro inferior a 0.5 micras, la sedimentación es demasiado lenta.
- 5) Magnética; la fuerza coercitiva de un producto paramagnético tal como la magnetita, es directamente proporcional a la superficie específica cualquiera que sea su forma geométrica.
- 6) Tamizado, es el método más sencillo para la clasificación granulométrica en el laboratorio y consiste en pasar el material sucesivamente por una serie de tamices o cedazos que posean orificios o mallas progresivamente decrecientes. El material que pasó a través de un tamiz y ha sido retenido en el siguiente porque sus orificios son de tamaño menor que el anterior, suele considerarse como de tamaño igual a la media aritmética de la abertura de ambos tamices, éste valor representa el "tamaño medio" o diámetro medio" y se representa por D_m .

Los tamices o cedazos se construyen con telas de malla de alambre cuyo diámetro de hilos y espaciado entre ellos están previamente especializados. Estas telas de tamizados son el fondo de cajas cilíndricas, metálicas o de madera de diámetro y altura entre 20 y 5 cm respectivamente, con bordes inferiores dispuestos de tal manera que el fondo de uno, encaja perfectamente en el borde superior del otro.

El espacio libre entre los hilos del tejido de un tamiz se llama abertura y con frecuencia se aplica la palabra "malla" para designar el número de aberturas existentes en una unidad de longitud; por ejemplo: Un tamiz de malla 10, tiene 10 orificios en una pulgada y su abertura tendrá una longitud de 0.1 pulgadas menos el espesor de un hilo.

Los tamices normales Tyler están basados en un tamiz de 200 mallas con un hilo de 0.05334 mm de espesor y con una abertura de 0.0074 cm y los siguientes varían según una razón fija igual a $\sqrt{2}$.

Cuando se requiere tamaños intermedios a los anteriores que permitan completar la serie, entonces la razón es igual a $4\sqrt{2}$.

Los tamices de la Nacional Bureau of Standards de Washington difieren de la serie Tyler porque están basados en el orificio de un mm (tamiz No. 18), y varían según la razón $4\sqrt{2}$.

Para realizar el análisis por tamizado, se empezará por limpiar los tamices perfectamente para quitarles cualquier partícula adherida; los tamices se encajan poniendo en la parte superior, el de malla más pequeña y al final, el de malla 200, completando la serie, un recipiente colector bajo el tamiz del fondo y una tapa sobre el tamiz superior. Se pone una cantidad conocida de material a analizar en el tamiz superior y se cubre con la tapa; se colocan en una armadura vertical accionada por un motor que describe un movimiento elíptico en un plano horizontal, la agitación dura de 5 a 10 min; se desmontan los tamices y se pesa cada fracción. Un ejemplo de expresar el análisis por tamizado es la siguiente tabla:

TAMICES TYLER	DIÁMETRO MEDIO DE LAS PARTÍCULAS D_m		FRACCIÓN EN PESO	FRACC. QUE PASAN POR CADA TAMIZ
- 8 + 10	0,2007	0,0791	0,03	1,0
- 10 + 14	0,1410	0,0555	0,14	0,97
- 14 + 20	0,1001	0,0394	0,25	0,83
- 20 + 28	0,0711	0,0280	0,20	0,58
- 28 + 35	0,0503	0,0198	0,14	0,38
- 35 + 48	0,0356	0,0140	0,09	0,24
- 48 + 65	0,0252	0,0099	0,06	0,15
- 65 + 100	0,0178	0,0070	0,04	0,09
- 100 + 150	0,0126	0,00496	0,03	0,05
- 150 + 200	0,0089	0,0035	0,02	0,02
			1,00	

Los datos se representan gráficamente en un histograma en función de la fracción masa retenida vs el diámetro medio de la partícula.

Por una gráfica log-log que muestre la fracción masa retenida en cada malla en función del diámetro de la misma (malla).

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL REQUERIDO

- Juego de tamices
- Balanza granataria
- Brocha
- Espátula
- Platos de unicel
- Bolsa de manta para producto

3.2 SERVICIOS AUXILIARES

- Energía eléctrica

3.3 SUSTANCIAS O CORRIENTES DE PROCESO

- Arroz
- Frijol
- Maíz

3.4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

- Molino de bolas

<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
MO - 320	Molino	Servicio: Mueliende de sólidos Tipo: Rotatorio de Bolas Marca: Hardinge Accionador: Motor de 2HP Velocidad de giro 37.5 RPM Material de constr: acero al carbón
BT - 321	Alimentador	Servicio: Alimentación de sólidos Accionador: motorreductor, con control automático tipo “oido eléctrico” Potencia: Velocidad de giro:

TA- 322	Tolva de alimentación	Servicio: Alimentación de sólidos Capacidad: 150 g/m Longitud superior: 35 cm Lado superior: 60 cm Longitud inferior: 45 cm Lado inferior: 30 cm Material de constr.acero al carbón
CL - 323	Clasificador	Servicio: Separar los sólidos por tamaño Tipo: Centrífugo:
SP - 325	Ciclón	Servicio: Separación y salida de producto. Capacidad: 1 m ³ Diámetro: Longitud: Material de constr: acero al carbón
SC - 326	Separador de finos	Servicio: Separa los sólidos finos Consta de: Ventilador de tiro inducido de 0.25 HP Filtro de bolsas
VCF - S	Válvula de control	Servicio: Regula la cantidad total de aire que circula en el molino Tipo: Mariposa
VCF- V	Válvula de control	Servicio: Controla la cantidad de aire y vapor de agua del sistema de clasificación Tipo: Mariposa
VCF- K VCF - T	Válvulas de control	Servicio: Regulan el tamaño de partícula del producto. Tipo: Mampara

Molino de Martillos

<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
MO - 330	Molino	Servicio: Muele cereales Tipo: Micropulverizador de Martillos Marca: Allen Bradley Co. Material de construcción: Acero Martillos sujetos por bulones a un disco giratorio dentro de una “caja rompedora” con tamiz Accionador: Motor eléctrico de 3HP Velocidad: 9950 RPM
TA - 331	Tolva de alimentación	Servicio: Alimentar los sólidos Capacidad: 200 g/m Longitud superior: 30 cm Lado superior: 45 cm Diámetro inferior: 20 cm Material de cons. Acero al carbón
FB - 330	Recipiente de producto	Servicio: Recibir el producto Tipo: Bolsa Material de construcción: Manta de algodón
FB - 331	Recipiente de finos	Servicio : Separa los polvos finos Tipo : Bolsa Mat. De construcción: Manta de algodón.

Molino de disco

<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
MO - 340	Molino	Servicio: Muele minerales Tipo: Disco giratorio Marca: Bico Ing. Accionador: Motor eléctrico de 3 HP Control de la abertura del disco: Tornillo de acercamiento sin seguro y resorte para fijarlo
TA 341	Tolva	Servicio: Alimentar los sólidos Capacidad: 15 g/min Longitud superior: 14 cm Diámetro superior: 10 cm Diámetro inferior: 2 cm Material de constr. Acero al carbón
FB - 342	Recipiente	Servicio: Almacenar producto Tipo: caja Largo: 30 cm Ancho: 15 cm Mat. constr. Acero al carbón

Molino de dientes

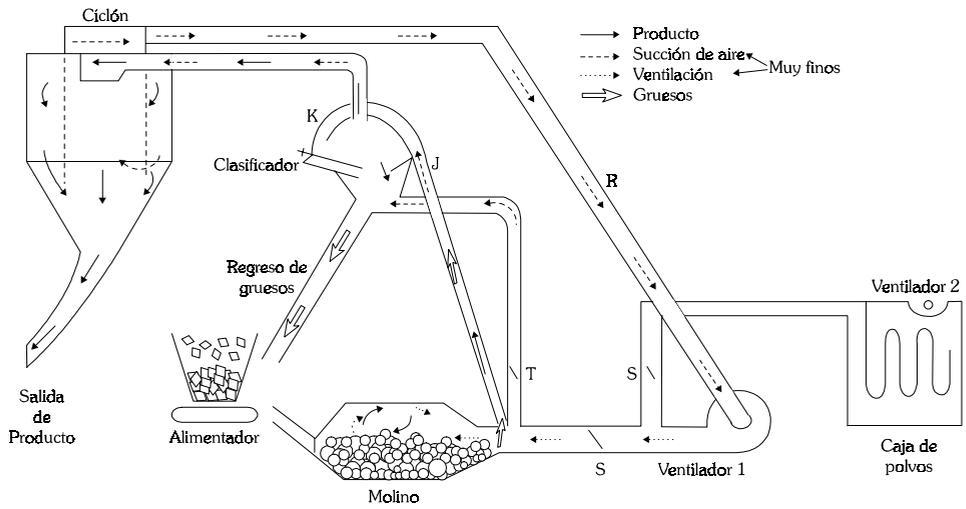
<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
MO - 350	Molino	Servicio. Muele cereales Tipo : Triturador de dientes con tornillo de ajuste entre los conos dentados Marca: CeCo Co Accionador: Motor eléctrico de ¼ HP

TA- 351 Tolva
Servicio: Alimentar los sólidos
Capacidad: 30 g/min
Longitud superior: 26 cm
Diámetro superior: 35 cm
Diámetro inferior: 12 cm
Material de constr. Acero al carbón

Molino de cuchillas

<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
MO - 360	Molino	Servicio: Moler cereales Tipo: Cuchillas Marca: Comminuting Machine Altura cuchilla:12.5 cm Ancho cuchilla:4.0 cm Espesor cuchilla: 5 mm Malla con abertura de 2 mm Accionador: Motor eléctrico Potencia de 3 HP y Velocidad de 1740 RPM Material de construcción: Acero Inoxidable
TA - 361	Tolva	Servicio : Alimentación de sólidos Tipo Charola Largo: 60 cm Ancho: 50 cmReducción : 20 cm Tapa: 20 x 10 cm
TA - 362	Tolva	Servicio: Recibe producto Tipo: Bolsa Diámetro: 50 cm Material de construcción: Lona de algodón

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO



3.6 TÉCNICA DE OPERACIÓN

Molino de Bolas Hardinge

1. Elija una posición de las válvulas S, V, K
2. Vierta el sólido en la tolva de alimentación
3. Accione la banda de alimentación
4. Encienda el motor de arranque del molino
5. Muela el sólido durante 20 min
6. Pese el material molido
7. Tome una muestra representativa y haga su clasificación por tamizado
8. Mida el consumo de energía eléctrica durante el proceso.
9. Seleccione otra posición de las válvulas, para obtener otro producto diferente y repita el proceso.

Molino de dientes, Martillos y Aspas

1. Seleccione la posición del control para elegir el tamaño de partícula.
2. Coloque las bolsas recolectoras de producto.
3. Encienda el motor de arranque del molino y espere que alcance su máxima velocidad.
4. Alimente el sólido por la tolva de alimentación
5. Tape la tolva durante la alimentación para evitar posibles accidentes por rebote del sólido.

5. CONTENIDO DEL INFORME DE LA PRÁCTICA

- a) Título
- b) Objetivo
- c) Descripción del proceso
- d) Representación del proceso en un diagrama de flujo.
- e) Formato con los resultados experimentales
- f) Desarrollo de los cálculos con:
 - El análisis de tamizado.
 - Una gráfica log - log que muestre la fracción masa retenida vs el diámetro de la malla.
 - Un Histograma de fracción masa retenida vs el diámetro medio de partícula.
 - El costo en \$ / Kg de material molido.
- g) Análisis y tendencias de resultados.
- h) Conclusiones y recomendaciones.
- i) Bibliografía.

6. CUESTIONARIO

1. Explique en qué consiste la operación de Molienda.
2. ¿Cuál es el objetivo de reducir el tamaño de partícula en algunas operaciones unitarias?
3. Mencione, cuándo menos 4 operaciones donde la reducción de partícula es importante para el proceso.
4. Mencione los factores que intervienen en la selección de un molino.
5. Mencione las diferentes maneras de clasificar un equipo de molienda.
6. Mencione 3 diferentes tipos de molinos y diga qué tipo de fuerza se aplica en cada uno y cómo funcionan.
7. Explique cómo funciona el molino de bolas.
8. ¿Qué ventajas ofrece este molino con relación a otro ordinario?
9. ¿En qué industria tiene aplicación este equipo?
10. Enumere y detalle los factores que afectan el tamaño del producto.
11. ¿Cómo se calcula el diámetro de la partícula molida?
12. ¿Cómo se especifica el tejido de una criba?
13. En el análisis de un producto. ¿cómo se expresan los resultados?

Nota: Consulte el apéndice de esta práctica.

7. NOMENCLATURA

P_m = peso de la muestra

P = Peso del producto obtenido

P_o = Potencia consumida

T = Tiempo de operación

Fr = fracción masa

D_m = Diámetro medio de la abertura de la malla

D_p = Diámetro medio de partícula

8. BIBLIOGRAFÍA

Foust, Wensel.-

Principles of Unit Operations.
John Wiley & Sons - 1999

Mc Cabe and Smith.-

Unit Operations of Chemical Engineering.
Mc Graw Hill - 1998

Brown G.G.-

Unit Operations.
John Wiley & Sons - 1990

Experimento 2.

FILTRACIÓN

.....

1. OBJETIVOS

- a) Determinar las constantes de filtración a través de pruebas experimentales en un minifiltro prensa..
- b) Encontrar el área de filtración de un filtro industrial para un problema propuesto a partir de los resultados obtenidos del inciso a)

2. TEORIA BÁSICA

Filtración es la separación de partículas sólidas ó semisólidas que se encuentran suspendidas en un fluido al pasar a través de un medio poroso, fibroso o granular llamado medio filtrante mediante la aplicación de una fuerza impulsora en un período de tiempo determinado.

La filtración tiene por objeto la clarificación de líquidos, la recuperación de sólidos y líquidos ,facilitar otras operaciones como secado y lavado de materiales etc.

Las principales variables que afectan al proceso de filtración y que deben tomarse en cuenta para seleccionar, diseñar u operar un equipo son:
Variables de proceso

- La concentración de sólidos
- El tamaño de partícula
- La temperatura
- El PH
- La viscosidad y densidad

Variables de diseño:

- Área de filtración,
- caída de presión a través del filtro,
- resistencia del medio filtrante
- flujo de filtrado
- Cantidad de sólidos retenidos
- Humedad de la torta
- Tiempo de lavado

En la filtración se identifican tres factores:

- a) Naturaleza de los sólidos. La filtración involucra la separación de sólidos compresibles e incompresibles, partículas deformables o rígidas de diferentes concentraciones y tamaños, que al depositarse en el medio filtrante ,formaran capas de sólidos (torta.)
- b) El medio filtrante: Lo fundamental en cualquier filtro es el medio filtrante cuyas características dependen del material del que se fabrica y de las técnicas empleadas en su elaboración, su selección se realiza tomando en cuenta los siguientes puntos:
 - Tamaño mínimo de partícula retenida
 - Permeabilidad o resistencia al flujo
 - Relación entre oclusión del medio o incremento de resistencia al flujo
 - Resistencia al calor, a la acción de productos químicos, a la abrasión, flexión y rotura.
 - Estabilidad dimensional
 - Facilidad de limpieza

Tipos de medios filtrantes: Telas metálicas, telas naturales o sintéticas, placas de asbesto o celulosa, hojas de papel o fibra de vidrio, sólidos sueltos etc.

El filtro ayuda : es un material finamente dividido que no se comprime por la presión que ejerce el líquido al pasar por este tipo de materiales, se agrega a suspensiones que presentan problemas a la filtración por falta de

compresibilidad y tamaño muy pequeño de partícula. Un filtro ayuda debe ser inerte ,ligero y debe formar una torta porosa; son ejemplo el carbón activado, pulpa de papel, tierra de diatomeas etc.

- c) La fuerza impulsora. La separación de los sólidos contenidos en un fluido es mediante una fuerza impulsora, de acuerdo a ella los filtros se clasifican en:
- Filtros por gravedad. La fuerza impulsora es la presión de la columna de líquido sobre el medio filtrante, un ejemplo es el filtro de arena abierto.
 - Filtros a vacío. La fuerza impulsora es la succión del lado de la salida del filtrado por medio de vacío, operan en forma cíclica y continua son ejemplos el filtro de hojas ,el filtro de tambor rotatorio.
 - Filtros a presión. La fuerza motriz es la presión dada por la fuerza motriz,un ejemplo es el filtro de placas y marcos o filtro prensa, donde el número de placas y marcos varia con la capacidad del filtro,es un filtro intermitente
 - Filtros centrífugos. La fuerza impulsora es la centrífuga se usan para separar sólidos de tamaño de partícula muy pequeña o de suspensiones diluidas.

Ecuaciones básicas que definen la filtración

El propósito fundamental de la filtración es obtener un fluido libre de partículas sólidas o semisólidas llamado flujo de filtrado (q).

Como el flujo de filtrado (q) depende de una fuerza impulsora en este caso, una diferencia de presiones (- ΔP) y existe una resistencia (R) del medio filtrante y de los sólidos depositados que se opone al flujo, lo anterior se puede expresar matemáticamente como:

$$q \propto (- \Delta P) / R \quad (1)$$

$$q = K' (-\Delta P)/R \quad (2)$$

Donde:

K' = constante de proporcionalidad.

Durante la filtración los sólidos se depositan sobre el medio filtrante, y el espesor de la capa de sólidos (torta) se incrementa, al mismo tiempo se forman canales o capilares entre los sólidos por donde fluye el filtrado en forma laminar. La resistencia debida a estos sólidos se incrementa también, entonces la cantidad de flujo de filtrado disminuye.

La ecuación que permite cuantificar la velocidad de un fluido en canales es la ecuación de Poiseuille quien publicó, en 1842, una relación matemática del flujo de un líquido a través de un capilar:

$$q = \frac{\pi r^4 (-\Delta P)}{8\mu L} \quad (3)$$

Donde:

q = flujo del fluido

r = radio del capilar

$(-\Delta P)$ = caída de presión a través del capilar

μ = viscosidad del fluido

L = longitud del capilar

La importancia de la ecuación de Poiseuille y su uso es que permite predecir el efecto potencial de la disminución del tamaño del capilar sobre el flujo y en el caso de la filtración sobre la resistencia de la torta

Posteriormente d'Arcy en 1856 describió la velocidad del flujo de aguas subterráneas en estratos del suelo mediante la siguiente relación:

$$u = (K_1) (-\Delta P / L) \quad (4)$$

Donde:

u = velocidad del fluido,

K_1 = coeficiente de permeabilidad del lecho

ΔP = caída de presión a través del lecho

L = espesor del lecho poroso

Desde el punto de vista práctico es mas importante determinar el flujo de filtrado (q) que la velocidad del fluido (u).

Por otra parte si el flujo volumétrico en un canal está dado por:

$$q = dV / dt = u A \quad (5)$$

Donde:

$dV / dt =$ es el cambio de volumen con respecto al tiempo (flujo volumétrico)

$A =$ área transversal del canal

Entonces, si la ecuación (4) se multiplica por el área transversal y se introduce la viscosidad del fluido como otra resistencia al flujo y se sustituye en la ecuación (5) obtiene la ecuación modificada de d'arcy:

$$q = \frac{dV}{dt} = K_1 \frac{(-\Delta P)}{\mu L} A \quad (6)$$

Si a la ecuación de Poiseuille, (3) se multiplica también por el área se puede escribir así:

$$q = \frac{dV}{dt} = \frac{r^2 (-\Delta P) \pi D^2}{8 \mu L} \frac{\pi D^2}{4} \quad (7)$$

Agrupando las constantes también puede escribirse:

$$q = \frac{dV}{dt} = K \frac{\Delta P}{\mu L} A \quad (8)$$

Entonces la ecuación modificada de d'arcy (6) y la ecuación de Poiseuille (8) son equivalentes y el coeficiente de permeabilidad K_1 puede escribirse como K:

$$K = \frac{\mu L}{(-\Delta P)A} \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

Esta es la primera aportación de la teoría para determinar la permeabilidad del lecho y se mide como la cantidad de fluido que pasa, en la unidad de tiempo. Para algunos materiales la unidad de permeabilidad es el d'arcy.

Aplicación de las ecuaciones a la filtración

· determinación de las resistencias

Si la permeabilidad es la facilidad con que fluye el filtrado, el inverso es la resistencia al paso del filtrado.

$$K = 1 / R$$

La resistencia tiene dos componentes uno, el de los sólidos depositados, (α) y otro, del medio filtrante (r) .

resistencia de la torta

La ecuación (8) puede escribirse:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\alpha} \frac{(-\Delta P)}{\mu L} A \quad (10)$$

Despejando α :

$$\alpha = \frac{A(-\Delta P)}{\mu L} \left(\frac{dt}{dV} \right) \quad (11)$$

La ecuación (11) permite determinar la permeabilidad a través de la torta de un espesor L fijo, pero este cambia continuamente; si se supone que cada capa que se deposita es constante, entonces, el producto del espesor L por el área A de filtración, es el volumen de la torta depositada (v) por unidad del correspondiente volumen de filtrado.

Si V es el volumen total de filtrado, entonces el volumen total de la torta depositada es:

$$A L = V v$$

Despejando L (12)

$$L = V v / A$$

La ec.(12) se puede sustituir en la (11)

$$\alpha = \frac{A^2(-\Delta P)}{\mu v V} \left(\frac{dt}{dV} \right) \quad (13)$$

Resistencia del medio filtrante

Sperry¹ fue de los primeros en establecer que la resistencia a la filtración está compuesta por dos resistencias en serie, la de la torta y la del medio filtrante esta consideración se sustituye en la ec. (13) se tiene:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-\Delta P A^2}{\mu(\alpha v V + r A)} \quad (14)$$

Al poner el inverso de la ecuación (14),

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \alpha v}{-\Delta P A^2 g_c} V + \frac{\mu r}{-\Delta P A g_c} \quad (15)$$

Al separar variables e integrar desde $t = 0$ a $t = t$ y $V = 0$ a $V = V$

$$\int_0^t dt = \frac{\mu \alpha v}{-\Delta P A^2 g_c} \int_0^V V dV + \frac{\mu r}{-\Delta P A g_c} \int_0^V dV \quad (16)$$

De la integración de la (16) , a presión constante, se puede despejar el tiempo de filtrado t:

$$t = \frac{\alpha\mu v}{-2\Delta P A^2 g_c} V^2 + \frac{\mu r}{-\Delta P A g_c} V \quad (17)$$

Donde:

V= volumen de filtrado, en (m³) recolectado en el tiempo t (s).

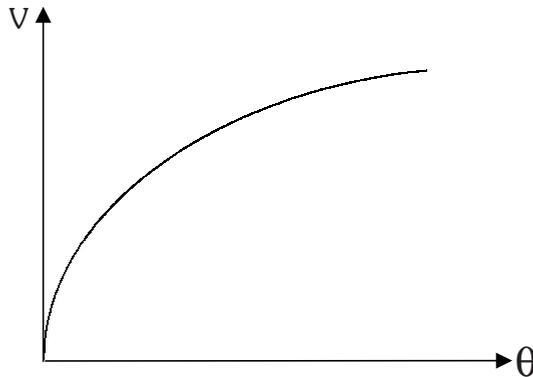
-Δ P = caída de presión en kg_f/ m²

A = área de filtración en m²

μ = viscosidad del filtrado en kg /m s

g_c = factor de conversión con valor de 9.81 en (kg_m/ kg_f) (m / s²)

Si se mide en tiempo en el que cae la primera gota de filtrado hasta que termine la filtración se obtienen una serie de datos que al hacer una gráfica de volumen contra el tiempo, se obtiene la siguiente gráfica. Así para el t = 0, V = 0



Relación volumen de filtrado V vs tiempo θ

Para una filtración a presión constante y en donde las variables del proceso no cambian, es decir, son constantes durante la filtración, la ecuación (15) puede escribirse:

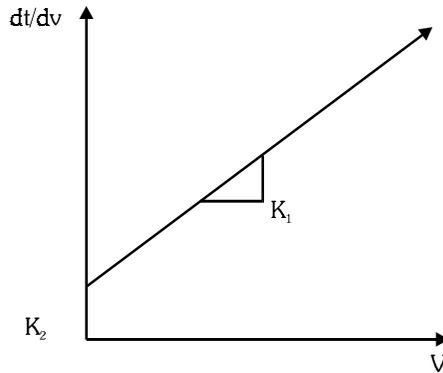
$$\frac{dt}{dV} = K_1 V + K_2 \quad (18)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{\mu \alpha v}{-\Delta P A^2 g_c} \quad (19)$$

$$K_2 = \frac{\mu r}{-\Delta P A g_c} \quad (20)$$

Suponiendo que durante una experimentación se han hecho las determinaciones de volumen recolectado en los diferentes intervalos de tiempo, dt , al graficar dt / dV vs. V se obtiene una línea recta:



Donde:

La pendiente de esta recta es K_1 y la ordenada al origen es K_2 , definidos con anterioridad en las ecuaciones (19) y (20), respectivamente.

Con estos valores de K_1 y K_2 se pueden despejar α y r , esto es:

$$\alpha = K_1 * \frac{A^2 * (-\Delta P) * gc}{w\mu} \quad (21)$$

$$r = K_2 * \frac{A * (-\Delta P) * gc}{\mu} \quad (22)$$

Se pueden hacer experimentalmente varias determinaciones a diferentes presiones; de esta manera, se puede calcular la variación de la resistencia con respecto a la presión.

Otra determinación importante es la de los efectos de compresión, es decir, el efecto de la presión en la resistencia específica de la torta. La correlación propuesta de Almy y Lewis es la siguiente:

$$\alpha = \alpha_0 * (-\Delta P)^s$$

Donde: α_0 : Resistencia específica a una presión de cero m./Kg.

s: Factor de compresibilidad (sin dimensiones).

Cuando el valor s es igual a cero, se dice que la torta es incompresible; cuando el valor es mayor que cero, se dice que la torta es compresible.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL REQUERIDO

- Probetas de dos litros
- Probeta de 25 ml
- Centrífuga de tubos
- Balanza de humedad
- Balanza granataria
- Espátula
- Charola galvanizada grande
- Charola de aluminio para muestra

3.2 SERVICIOS AUXILIARES

- Agua
- Aire comprimido

3.3 SUSTANCIAS O CORRIENTES DE PROCESO

- Suspensión de carbonato de calcio o de PVC al 20 % en peso

3.4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
FP - 600	Filtro prensa	Servicio: Separación de CaCO_3 . Tipo : Placa y marco manual. No.de placas: 3 No. de marcos: 3 Capacidad: Área de filtración: Diámetro de Placas y marcos: 10 cm Espesor de los marcos: 1 cm Material de construcción del cuerpo, placas/marcos: Acero al carbón. Mat de construcción de medio filtrante: Lonas de algodón
FB - 600	Tanque de almacenamiento	Servicio: Almacenamiento de CaCO_3 Tipo: Atmosférico Capacidad: 50 litros Diámetro: :35 cm Longitud: 68 cm. Material de construcción: Acero al carbón

FB – 610 y FB - 620	Probetas de almacenamiento	Servicio Recolección de filtrado. Capacidad : 2 litros con graduación en ml Mat.de construcción: PVC Diámetro:8.5 cmLongitud.: 49 cm
GA- 600	Bomba	Servicio: Alimentación de CaCO_3 Gasto: Material de construcción: Bronce Accionador Motor eléctrico Potencia de motor :1/4 de HP
AG - 600	Agitador	Servicio: Agitación de la suspensión Tipo: Propela marina Diámetro: Accionador: Motorreductor

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO

BOMBA CENTRIFUGA

Clave: GA - 600
 Servicio: Alim. sol. CaCO₃
 Gasto:
 Cabeza:
 Mat. de construcción
 Acelerador: Motor eléctrica
 Tipo: Inducción J. arilla
 BHP: 1/4 HP
 RPM: 1750
 Encapsulado: TCCV
 Factor de servicio: 1
 Aislamiento: NEMA "B"

AGITADOR

Clave: GA - 600
 Servicio: A6 de sol. CaCO₃
 Tipo: Paleta Marina
 Diámetro agitador
 Accionador: Motor reductor
 Tipo: Inducción J. arilla
 BHP:
 RPM:
 Encapsulado: TCCV
 Fac. de servicio: 1

FILTRO PRENSA

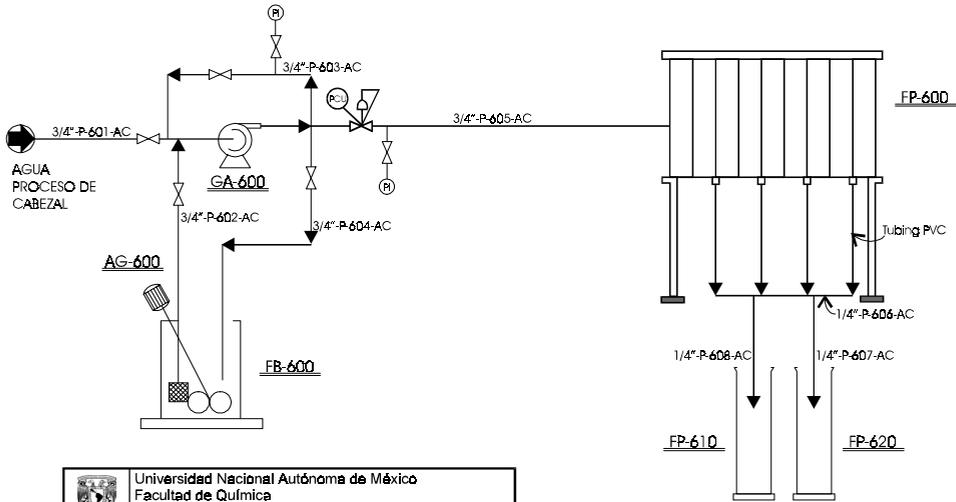
Clave: FP - 600
 Servicio: Separación CaCO₃
 Tipo: Placa y marco / manual
 Capacidad:
 Área de filtración:
 Núm. de placas: 6
 Diam. de placas: 10 cm
 Num. de marcos:
 Mat. construcción
 Cuerpo: AC. al carbón
 Mat. construcción
 placas / marcos:
 Mat. construcción
 medio fil.: Lanas de Algodón

TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Clave: FB - 600
 Tipo: Atmosférico
 Capacidad: 5 lts
 Servicio: Alim. de CaCO₃
 Diámetro: 20 cm
 Longitud: 70 cm
 Mat. de construcción
 Acelerador: PVC

PROBETAS DE ALMACENAMIENTO

Clave: FB - 610 y FB - 620
 Capacidad: 2 lts c/u
 Servicio: Recolección filtrada
 Diámetro: 10 cm
 Longitud: 50 cm
 Mat. de construcción
 Acelerador: PVC



	Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química Laboratorio de Ingeniería Química
	Diagrama de Tuberías e Instrumentación Minifiltro prensa
	Diseño: GLA Revisó: MLGP Elaborado: ARAB ARQ
FQ - DTI - 100	Revisión (0)

3.6 TÉCNICA DE OPERACIÓN

- a) Prepare una suspensión de entre 15-20 % en volumen de CaCO_3 .
- b) Determine la concentración de la suspensión con una centrífuga de laboratorio de 5000 r.p.m.. Un volumen medido de la suspensión se somete a una centrifugación, se mide la parte líquida restante en una probeta para medir la diferencia de volumen de sólidos depositados en cada tubo de muestra de la centrífuga. Esto indica el porcentaje en volumen de sólidos.
- c) Agite la suspensión.
- d) Coloque las placas, marcos y lonas en el filtro.
- e) Conecte las salidas de filtrados a la línea que va a las probetas.
- f) Accione la bomba de alimentación, primero recircule la suspensión y luego alimente poco a poco al filtro.
- g) Con la válvula reguladora mantenga una presión constante de 1 Kg/cm² hasta el final de la operación.
- h) Mida el volumen de filtrado con respecto al tiempo.
- i) Haga pasar aire a través de la torta y descarguela cuando el aire de secado no lleve agua.
- j) Mida el área total de filtración.

4. FORMATO PARA LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

Minifiltro prensa

Volumen (m ³) de filtrado	Tiempo (seg.)	ΔV	$\Delta \theta$	$\Delta\theta/\Delta V$

Concentración de la suspensión: _____ %.

Dimensiones de los marcos: _____ .

Área de filtración (experimental): _____ m².

Volumen de filtrado: _____ m³.

Peso de sólidos húmedos obtenidos: _____ Kg.

Humedad: _____ %.

Observaciones: _____ .

Grupo: _____ Fecha: _____ Profesor: _____

5. CONTENIDO DEL INFORME DE LA PRÁCTICA

- a) Título de la práctica.
- b) Objetivo.
- c) Descripción del proceso.
- d) Representación del proceso en un diagrama de flujo.
- e) Formato de resultados experimentales.
- f) Desarrollo de cálculos con:
 - Las gráficas de $d\theta/dV$ vs. V y la de V vs. θ .
 - Los valores de K_1 y K_2 , α y r para cada corrida.
 - El área de filtración requerida para el problema planteado.
- g) Análisis de resultados y tendencias de resultados.
- h) Conclusiones y recomendaciones.
- i) Bibliografía.

6. CUESTIONARIO

- a) Como Interpreta las gráficas de V vs θ y la de $dv/d\theta$ vs θ
- b) Que aplicación tiene determinar los valores de K_1 y K_2
- c) Que indica el factor de compresibilidad
- d) Que variable influye en forma determinante sobre la resistencia específica de la torta .
- e) Cuáles serían las consideraciones básicas para elegir un filtro prensa.

7. NOMENCLATURA

A = área de filtración

V = Volumen de filtrado

θ = Tiempo

W = Masa de la torta seca

α = Resistencia específica de la torta

r = resistencia del medio filtrante

s = Factor de compresibilidad

V_e = Volumen de filtrado teórico

K_1 y K_2 = Constantes de filtración

8. BIBLIOGRAFÍA

- a) Foust, Wenzel.
Principles of Unit Operations.
John Wiley & Sons.
1998.
- b) Mc. Cabe and Smit.
Unit Operations of Chemical Engineering.
Mc. Graw-Hill
1999.
- c) Ocón y tojo.
Problemas de Ingeniería Química Operaciones Básicas.
Aguilar S.A. de Ediciones.
1998.

Experimento 3.

CENTRIFUGACIÓN

.....

1. OBJETIVO

Determinar el área equivalente (Σ) de una centrífuga industrial que maneje un flujo 200 veces mayor al flujo de alimentación experimental en m^3/s , que proporcione una concentración en el efluente de 0.0008 g/ml en la centrífuga de laboratorio.

2. TEORÍA BÁSICA

La separación centrífuga es desde hace más de un siglo una de las operaciones unitarias más importantes en procesos claves de las industrias químicas, farmacéuticas, tratamiento de efluentes, purificación de aceites combustibles y lubricantes y suspensiones en general.

En el campo de la tecnología de la separación mecánica las separadoras y decantadoras se catalogan dentro de las centrifugadoras, se emplean para la concentración de sólidos, clarificación de suspensiones y separación de mezclas de líquidos con eliminación simultánea de sólidos.

Esencialmente la centrifugación es una decantación selectiva de los componentes insolubles de una mezcla bajo condiciones de gravedad artificial.

En la industria existe una gran variedad de centrifugas las cuales pueden ser clasificadas de muy diversas formas, a continuación se realiza una clasificación de un pequeño grupo de centrifugas conocidas como sedimentadoras y se realiza esta clasificación tomando como referencia la cantidad de sólidos a la entrada de la centrifuga.

Descarga manual, 0-5% de sólidos.

Este tipo de centrífuga es también llamada de tambor macizo. Los sólidos se acumulan en el recinto de lodos y deben de ser removidos en forma manual parando la máquina y abriendo el tambor.

Descarga automática intermitente, 0-30% de sólidos.

También son conocidas como autodeslodantes. Los sólidos se acumulan en el recinto de lodos y son expulsados en forma intermitente y automática a través de los orificios de descarga.

Descarga continua, 0-40% de sólidos.

Dentro de la industria química es conocida como de toberas. Los sólidos se acumulan en el recinto de lodos y se expulsan en forma continua a través de toberas.

Tornillo transportador, 0-65% de sólidos.

Este tipo de centrífuga es también conocida como decantador. Tienen un diseño completamente diferente a las demás centrífugas. Están equipadas con un tornillo transportador que les permite descargar en forma continua los sólidos.

Teoría de la sedimentación centrífuga.

La ecuación para la sedimentación natural de una partícula es:

$$v_s = (\Delta \rho d^2 g) / (18 \eta) \quad (1)$$

Esta ecuación es conocida como la **ley de Stokes para la sedimentación natural**.

Para aumentar la velocidad de sedimentación la fuerza gravitacional (g) puede sustituirse por una gravedad artificial conocida como fuerza centrífuga (ωr). Podemos deducir por analogía de la ecuación (1) la velocidad de sedimentación de una partícula en suspensión dentro de un fluido que gira es:

$$v_g = (\Delta \rho d^2 (\omega^2 r)) / (18 \eta) \quad (2)$$

Esta ecuación es conocida como la **ley de Stokes para suspensiones en rotación**.

Si consideramos que $v_g = x/t$. En donde el tiempo t representa el tiempo en que el líquido está en el tambor y se define como $t = V/Q$ en donde V es el volumen del líquido a un tiempo determinado y Q es el flujo del líquido a través del tambor.

$$x = v_g t = \Delta\rho\omega^2 r V d^2 / 18\eta Q \quad (3)$$

Si se considera al líquido en el tambor como una capa líquida de espesor s y si x es mayor que la distancia inicial de la partícula desde la pared del tambor, la partícula será separada de la fase líquida, de otra forma permanecerá en suspensión. En un sistema ideal $x = s/2$ la mitad de las partículas de diámetro d serán separadas de la suspensión y la otra mitad no. Por lo tanto si ordenamos la ecuación anterior:

$$Q = 2 (\Delta\rho d^2 / 18\eta) * (V\omega^2 r / s) \quad (4)$$

Siendo el primer grupo del lado derecho de la ecuación los parámetros del sistema que siguen la ley de Stokes ($\Delta\rho d^2 / 18\eta$) y el segundo grupo ($V\omega^2 r / s$) los parámetros que definen las dimensiones del equipo, esto también lo podemos escribir de la siguiente manera:

$$Q = (2 v_g \Sigma) \quad (5)$$

En donde:

$$v_g = (\Delta\rho d^2 / 18\eta) g$$

$$y \Sigma = V\omega^2 r / gs$$

En donde sigma (Σ) tiene dimensiones de $(\text{longitud})^2$

El área equivalente (Σ) de una separadora centrífuga se define como la superficie que debería tener un tanque de sedimentación natural para entregar un flujo clarificado (m^3 / h) igual al de la centrífuga en cuestión de cualquier suspensión.

También es posible obtener el diámetro de la partícula de las ecuaciones anteriores.

$$d = \sqrt{\frac{18\eta v_g}{\Delta\rho g}} \quad (6)$$

$$v_g = \frac{Q}{2\Sigma}$$

Con el fundamento anterior el área equivalente de dos centrífugas se encuentran relacionadas por la siguiente relación.

$$Q/\Sigma = Q_1/\Sigma_1 = Q_2/\Sigma_2 = Q_3/\Sigma_3 = \dots Q_n/\Sigma_n = 2vg \quad (7)$$

Charles M. Ambler desarrolló para los diferentes tipos de tambores las ecuaciones correspondientes para el cálculo de el área equivalente .

a) Centrífuga tubular

$$\Sigma = L \omega^2/g (r_2^2 - r_1^2) / \ln (2r_2^2 / (r_2^2 - r_1^2)) \quad (8)$$

b) Centrífuga de discos y de cámaras

$$\Sigma = 2 \pi \omega^2 N (r_2^3 - r_1^3) / (3g C \tan \theta) \quad (9)$$

En donde:

r_1 = Radio interno superior del tambor

r_2 = Radio interno de la base del tambor

N = número de discos, para la centrífuga de cámaras N = 1

ω = velocidad angular radianes /s

L = Altura del tambor

$\theta = 45^\circ$ Angulo formado entre los discos

C = 1.8 Constante del equipo

Una correlación empírica que no tiene dimensiones exactas, y es muy utilizada en el diseño de centrífugas de discos es la siguiente.

$$\Sigma = 2 \omega^{1.5} N (r_2^{2.75} - r_1^{2.75}) / (3g C \tan \theta) \quad (10)$$

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAL REQUERIDO

Accesorios para centrífuga de cámaras	12
Vaso de precipitado de 600 ml	5
Cubeta de plástico 10 litros	3
Probeta graduada de 2000 ml	2
Tubos de ensaye	4
Agitador de vidrio o brocha	1
Balanza granataria sin pesas	1
Espátula	1
Cronómetro	1
Vernier	1
Charola chica	1
Probeta para densímetro	1
Densímetro de 0.8 a 2.0	1
Embudo	1
Tubos con muestra patrón	20
Tabla de concentraciones de la muestra patrón	1

3.2. SERVICIOS AUXILIARES

- Energía eléctrica.

3.3. SUSTANCIAS O CORRIENTES DE PROCESO

- Suspensión al 3% de Cloruro de polivinilo (PVC) o de Carbonato de calcio CaCO_3
- Muestra patrón para análisis por turbidimetría

3.4. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

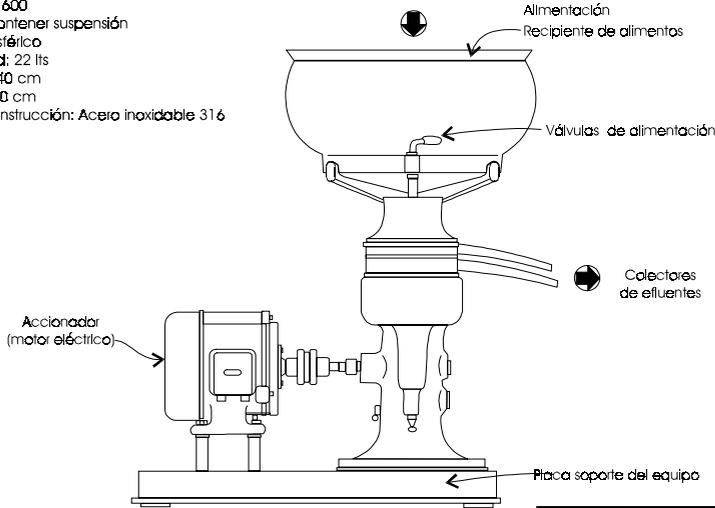
<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
EC-600	Centrifuga	Servicio: Remover sólidos de líquido. Marca: Westfalia Separetor Modelo: LWA-205 Tipo: Tambor de Cámaras, Discos o Toberas. Velocidad de giro del tambor:12000 RPM Capacidad : Operación: Intermitente. Material de construcción: Acero Inoxidable 316 Accionador: Motor eléctrico, tipo inducción jaula de ardilla, protección TCCV. Potencia del motor: 0.45 Kw para 220/380 V Velocidad de giro del motor:1455 rpm
FB-600	Tanque de almacenamiento	Servicio: Contener la suspensión Tipo: Atmosférico Capacidad: 22 litros Diámetro: 40 cm Longitud: 20 cm Material de construcción: Acero Inoxidable 316 Dimensiones del equipo completo: Largo:68.5 cm Ancho57.0 cm Alto: 79.5 cm Peso total: 96 Kg Peso de operación: 76 Kg

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO

TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Clave: FB - 600
 Servicio: Contener suspensión
 Tipo: Atmosférico
 Capacidad: 22 lts
 Diámetro: 40 cm
 Longitud: 20 cm
 Mat. de construcción: Acero inoxidable 316

Alimentación manual de una solución CaCO_3



CENTRIFUGA

Clave: EC - 600
 Servicio: Remover sólidos de líquido
 Tipo: Tambor de cámaras
 Fluidos: CaCO_3 y H_2O
 Capacidad: 22 lts
 Capacidad continua: 24 lts/min
 Operación: Intermiteente
 Mat. de construcción cuerpo: Ac./Inox. 316
 Mat. de construcción interiores: Ac./Inox. 316
 Velocidad de giro del tambor: 1200 rpm
 Marca: Westfalia
 Peso total: 96 kg
 Peso en operación: 76 kg
 Dimensiones de equipo:
 Largo: 68.5 cm
 Ancho: 57.0 cm
 Alto: 79.5 cm
 Accionador: Motor eléctrico
 Tipo: Inducción jaula de ardilla
 Protección: TCCV
 Potencia: 0.55 kw
 Velocidad de giro: 1455 rpm

	Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química Laboratorio de Ingeniería Química
	Diagrama de Flujo Centrifuga de laboratorio Westfalia
	Diseño: GLA Revisó: MLGP Elaborado: ARAB ARQ
FQ - DF - 100	Revisión (0)

Para realizar esta práctica se usará la centrífuga en su modalidad de tambor de cámaras.

Accesorios del tambor de cámaras

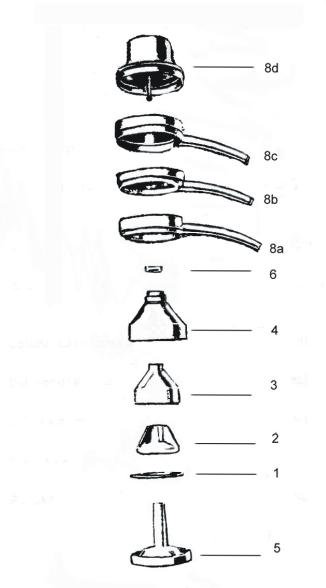


Figura 1
Partes del Tambor de Camaras.

<i>Número de la figura</i>	<i>Nombre de la pieza</i>	<i>Número de piezas</i>
1	Empaque de hule	1
2	Ala interior	1
3	Campana interior	1
4	Cubierta del tambor	1
5	Base del tambor	1
6	Tuerca del tambor	1
7	Tornillo regulador de efluente	1
8a	Colector de líquidos ligeros	1
8b	Colector de líquidos pesados	1
8c	Colector de inundación	1
8d	Recipiente interior	1
9a	Llave de alimentación	1
9b	Recipiente de alimentación	1

3.6 TÉCNICA DE OPERACIÓN

1. Arme la centrífuga como tambor de cámaras, según las instrucciones siguientes y guiándose con la tabla 1 y la figura 1.
 - Instale el empaque de hule (1) en la ranura de la base del tambor.
 - Coloque el ala interior (2).
 - Coloque la cámara interior (3) de tal forma que su guía embone con la de la ala (2).
 - Coloque la cubierta del tambor (4) y apriete la tuerca (6) con la llave correspondiente.
 - Instale el tambor armado en el eje del rotor, asegurándose que entre en la ranura de éste.
 - Una vez armado el tambor, es necesario ensamblar los siguiente accesorios.

Colector de líquidos ligeros (8a)

Colector de líquidos pesados (8b)

Colector de inundación (8c)

Recipiente interior (9)

Recipiente de alimentación (10b)

2. Verifique que las piezas embonen perfectamente y asiente bien el tambor sobre el rotor.
3. Llene el tambor de la centrífuga con agua (son necesarios aproximadamente 400 ml.
4. Prepare 12 litros de suspensión al 3% en peso de CaCO_3 , (se recomiendan 3 L de suspensión para cada corrida).
5. Verifique que la válvula de alimentación esté cerrada, la posición de cierre es en ambos lados en forma paralela y junto al recipiente de alimentación.

6. Ponga 3 litros de la suspensión en el recipiente de alimentación de la centrífuga agitando constantemente.
7. Accione la centrífuga y espere a que alcance su velocidad máxima (5 min).
8. Abra totalmente la válvula (la posición de abertura máxima es perpendicular al recipiente de alimentación) y tome el tiempo con el que se alimenta la suspensión.
9. Tome el tiempo y el volumen del efluente y almacénelo en una cubeta.
10. Apague la centrífuga cuando la alimentación haya terminado y espere a que se detenga totalmente.
11. Desarme el tambor y límpielo y lave todas las piezas.
12. Repita la operación eligiendo otra apertura de la válvula del recipiente de alimentación.
13. Tome una muestra global del efluente para cada corrida y determine su concentración por comparación con la muestra patron.
14. Mida el radio superior e inferior del tambor.

4. FORMATO PARA LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

Concentración inicial: (gr sólido) / (l suspensión) =

Material utilizado =

Densidad del material utilizado =

Posición de la válvula de alimentación	Volumen del efluente	Tiempo θ	Concentración final

Flujo de alimentación = _____

Altura del tambor = _____ cm

Radio menor = _____ cm

Radio mayor = _____ cm

Velocidad = _____ cm

Posición de la válvula de alimentación.

Observaciones _____

Grupo: _____ Profesor: _____ Fecha: _____

5. CONTENIDO DEL INFORME DE LA PRÁCTICA

- a) Título
- b) Objetivo
- c) Descripción del proceso
- d) Representación del proceso en un diagrama de flujo
- e) Formato con los resultados experimentales.
- f) Desarrollo de cálculos tomando como base las siguientes preguntas.
 - ¿Cuál es el valor del área equivalente del tambor de cámaras?
 - Calcula el tamaño de partícula mínimo que puede separar la centrífuga para cada flujo.
 - Realiza una gráfica de flujo volumétrico vs diámetro de partícula y otra vs eficiencia.
 - Determina el valor del área equivalente para una centrífuga capaz de manejar 200 veces el flujo experimental en m^3/s ., que proporcionó la concentración de 0.0008 g/ml en el efluente.
- g) Análisis y tendencias de resultados
- h) Conclusiones y recomendaciones.
- i) Bibliografía

6. CUESTIONARIO

1. ¿En qué consiste la ley de Stokes para suspensiones en rotación?
2. ¿Cuál es el concepto de área equivalente?
3. ¿Cuáles son las principales aplicaciones de las centrífugas?
4. Mencione tres recomendaciones para prevenir un accidente al utilizar una centrífuga.
5. ¿En qué industrias se utiliza la separación centrífuga?
6. ¿Qué tipos de descarga se utiliza en una centrífuga y en qué consiste?
7. ¿Qué datos experimentales necesitas?
8. Escribe tres unidades de concentración.
9. ¿Cómo se encuentra el diámetro de la partícula?

7. NOMENCLATURA

A = superficie (m^2)

C = parámetro que depende de la geometría del equipo y va de 1-1.8

d = diámetro de la partícula

F = fuerza neta

F_a = fuerza de arrastre ($Kg\ m/s^2$)

F_e = fuerza debida al empuje de Arquímedes ($Kg\ m / s^2$)

g = aceleración de la gravedad = $9.8\ m/s^2$

l = radio de descarga de la fase ligera

m = masa de la partícula (kg)

N = número de discos

P = peso de la partícula

Q = flujo volumétrico (m^3/s)

r₁ = radio interno (m)

r₂ = radio externo (m)

Re = número de Reynolds = $(v\ d\ \rho\ m) / \mu$

S = área transversal de la partícula

T = tiempo

V = volumen de la partícula (m³)

v_s = velocidad de sedimentación

Σ = área equivalente (m²)

ω = velocidad angular (1 /s²)

η = viscosidad del fluido (Pas)

Δρ = ρ - ρ_m (Kg / m³)

ρ = densidad del sólido para el carbonato de calcio = 2.770 Kg/m³

ρ_m = densidad del medio (Kg / m³)

X = distancia (m)

8. BIBLIOGRAFÍA

- a) R.H. PERRY y C.H. CHILTON
Chemical Engineering Handbook
Mc Graw Hill
- b) MACBE & SMITH
Unit Operations of Chemical Engineering
Mc Graw Hill
- c) FOUST ALAN S.
Principios de Operaciones Unitarias
John Wiley & sons
- c) Westfalia Separator. Westfalia laboratory centrifuge
for bench and Pilot Scale Operations model
LWA-205.
- d) Tesis profesional.
Optimización de las condiciones de operación de la Centrífuga
WESTFALIA del Laboratorio de Ingeniería Química. Víctor Manuel
Vilchis Ruíz 1997.
- e) Charles M. Ambler “The fundamentals of separation, including
sharples, sigma value” for predicting equipment equipment
performance” Industrial and Engineering Chemistry .
Vol 53 Num.6 June 1961 pag 430 - 433

Experimento 4.
TORRE DE PARED MOJADA

.....

1. PROBLEMA

Calcule usted el coeficiente de transferencia de masa individual fase gas K_G , en una columna de pared mojada, que opera a un flujo de aire de 300 ft³/hr. a contracorriente con un flujo de agua de 20 Gal. /hr. y una temperatura de 30 °C.

2. TEORÍA BÁSICA

Los coeficientes de transferencia de masa se pueden determinar en una columna de pared mojada, donde una película líquida descendente fluye por la pared del tubo a contracorriente con un fluido gaseoso. En este caso se usará como líquido el agua y como gas el aire, se medirá la transferencia de agua desde la fase líquida a la fase gaseosa, una vez efectuado el paso del vapor de agua al aire. La cantidad de agua transferida se puede medir por medio de la diferencia de humedad del aire entre la entrada y salida del aparato, siendo esta, una función de la presión parcial del agua en el aire.

En la ecuación de difusión de Stefan, el coeficiente de transferencia de masa k_G es la constante de proporcionalidad del gradiente de concentraciones, presentado en la zona interfacial gaseosa.

$$NA = k_G \Delta P_A$$

o bien

$$NA = \frac{D_{AB} * P_T * \Delta P_A}{R * T * B_T * P_{BM}}$$

en donde

$$P_{BM} = P_T - \frac{(P_1^0 + P_1 + P_2^0 + P_2)}{4}$$

y

$$\Delta P_A = \frac{(P_A^0 - P_A)_{ent} - (P_A^0 - P_A)_{sal}}{\ln \left[\frac{(P_A^0 - P_A)_{ent}}{(P_A^0 - P_A)_{sal}} \right]}$$

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL REQUERIDO

- ···· 2 Termómetros
- ···· 1 Psicrómetro
- ···· 1 Cronómetro
- ···· 1 Par de guantes
- ···· 1 Piseta

3.2 SERVICIOS AUXILIARES

- ···· energía eléctrica
- ···· vapor
- ···· aire comprimido

3.3 SUSTANCIAS O CORRIENTES DE PROCESO

- ···· agua destilada
- ···· aire comprimido

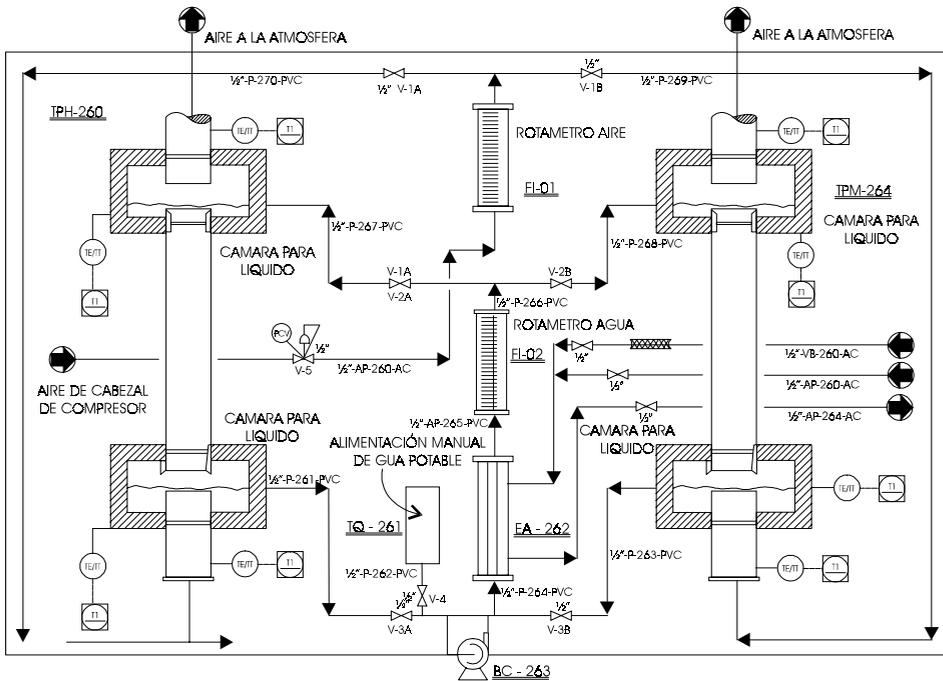
3.4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
TPH - 260	Torre de Paredes mojadas	Servicio: Humidificación de aire Diámetro interno 2.04 y 3.03 cm Longitud : 101.6 cm Material de construcción: Vidrio Pirex Equipo adicional : Dos cámaras para liquido integrada
TQ -261	Tanque de almacenamiento	Servicio: Almacenamiento de agua destilada. Capacidad : 4lts. Diámetro: 10 cms. Longitud 40 cms. Matrial de construcción: Acrilico
BC _263	Bomba para alimentación de agua	Servicio: Alimentación de agua a la columna Tipo Centrifuga horizontal Capacidad : 3GPM Material de construcción: Acero al carbón Carga total: 4 psig
CC-101	Cambiador de calor de doble tubo	Servicio: Calentamiento del agua de proceso Tipo: Doble tubo concéntrico Fluido anulo: Agua- vapor Fluido exterior: líquido de proceso Carga térmica: Área de transferencia de calor: Material de construcción: Cobre
	Tanques de regulación de presión	Servicio :Mantiene constante el el suministro de agua

Instrumentación

1. Válvula reguladora de presión que controla la presión del aire, a 0.5 Kg/cm².
2. Rotámetro para medir el flujo de aire en ft³/hr. std.
3. Rotámetro para medir el flujo de agua en Gal/hr.
4. Manómetro para medir la presión de vapor al intercambiador a 0.1 Kg/cm².
5. Termómetro Bimetálico para medir la temperatura de la mezcla vapor-agua.

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO



SIMBOLOGÍA

	Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química Laboratorio de Ingeniería Química
	Diagrama de Tuberías e Instrumentación Torre de pared mojada
	Diseño: GLA Revisó: MLGP Elaborado: ARAB ARQ
	FQ - DF - 100
	Revisión (0)

	Válvula de compuerta	EA	Intercambiador de cargador
	Válvula reguladora de presión	FI	Indicador de flujo (rotámetro)
	Termopares	BC	Bomba centrífuga
	Indicador de Temperatura en Tablero	VB	Vapor de baja presión
TPH	Torre de pared húmeda	AP	Agua potable
TQ	Tanque	P	Agua

3.6 TECNICA DE OPERACIÓN

1. Llene el tanque de almacenamiento con agua destilada
2. Abra totalmente la válvula de descarga del tanque de almacenamiento.
3. Abra a $\frac{1}{4}$ de vuelta la válvula de alimentación de agua del domo de la torre.
4. Conecte y accione la bomba.
5. Permita que el agua que desciende por la columna se acumule unos 3 cms en el tanque de calma del fondo de la torre, regulando esto con la válvula que recircula el agua a la bomba.
6. Cuando el flujo este constante y controlado a 20 GPH cierre la válvula de descarga del tanque de almacenamiento.
7. Purgue la línea de vapor.
8. Alimente vapor al cambiador de calor a una presión de 0.2 Kg/cm^2
9. Al mismo tiempo, abra la válvula que alimenta agua a la línea de vapor del cambiador, haciendo una mezcla vapor - agua como fluido caliente para calentar el agua de proceso aproximadamente a 30°C .
9. Alimente aire comprimido a una presión de un Kg/cm^2 en la válvula reguladora de presión, y en el rotámetro aproximadamente a un flujo de 200 FCSH (Pies cúbicos estándar por hora).
10. Deje operar la torre durante 20 minutos para que se estabilice y después mida la temperatura de entrada y salida del agua y las temperatura de bulbo seco y húmedo del aire a la entrada y a la salida.
11. Cierre la válvula de suministro de vapor y la de agua
12. Apague y desconecte la bomba
- 12 Regrese el agua de la línea al tanque de almacenamiento de agua
- 13 Cierre la válvula de suministro de aire
14. Apague el compresor

4. FORMATO PARA LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

TIEMPO (min)	AIRE	AIRE				AGUA		
	FLUJO FCSH	ENTRADA		SALIDA		FLUJO GPH	ENTRADA	SALIDA
		t_s °C	t_h °C	t_s °C	t_h °C		t °C	t °C
5								
10								
15								
20								

TIEMPO (min)	AIRE	AIRE				AGUA		
	FLUJO FCSH	ENTRADA		SALIDA		FLUJO GPH	ENTRADA	SALIDA
		t_s °C	t_h °C	t_s °C	t_h °C		t °C	t °C
5								
10								
15								
20								

DIAMETRO DE LA TORRE USADA:

Grupo _____ Fecha _____ Profesor _____

OBSERVACIONES: _____

5. CONTENIDO DEL INFORME DE LA PRÁCTICA

- a) Título
- b) Problema
- c) Descripción del proceso
- d) Representación del proceso en un diagrama de flujo
- e) Formato con los resultados experimentales
- f) Desarrollo de los cálculos con el cuestionario resuelto
- g) Análisis y tendencias de resultados
- h) Conclusiones y recomendaciones
- i) Bibliografía

6. CUESTIONARIO

1. ¿En cuánto tiempo alcanza la columna una operación estable?
2. ¿Cómo asegura que la columna alcanza una operación estable?
3. ¿Cuál es el área de transferencia?
4. Calcule el flujo de agua evaporada y transferida al aire através de la columna en Kg de agua / hr.
5. ¿Que diferencia existe entre flujo y flux?
6. Calcule el flux de transferencia de masa N_A
7. ¿Cuál es la fuerza directora que favorece la transferencia de masa?
8. Calcule la fuerza motriz en la interfase agua-aire.
9. A las condiciones de operación establecidas, ¿qué valor tiene el coeficiente de transferencia de masa k_G ?
10. ¿Cuál es el valor de espesor de la película interfacial?

7. NOMENCLATURA

P_A^o = presión de vapor del agua

P_A = presión parcial del agua en el aire. Los subíndices 1 y 2 se refieren a la posición de entrada y salida de la torre.

N_A = material transferido en Kgmol/seg. m^2 .

D_{AB} = Coeficiente de difusión m^2 /seg.

P_T = Presión total en mm Hg.

R = Constante de los gases m^3 atm. / Kgmol oK .

T = Temperatura absoluta en oK .

P_{BM} = Presión parcial media aritmética del aire a través del cual el vapor se difunde (mm Hg).

Δp_A = Diferencia media logarítmica entre la presión de vapor de agua en equilibrio con el líquido y la presión parcial del vapor de agua en el aire (mm Hg).

B_T = espesor de la interfase líquido-gas (m.)

t_s = temperatura de bulbo seco.

t_h = temperatura de bulbo húmedo.

FCSH = pies cúbicos standar por hora.

GPH = galones por hora.

8. Bibliografía

- a) Bird Byron
Transport Phenomena
WILEY 1990
- b) Antony L. Hines
Robert N: Maddox
Transferencia de Masa, Fundamentos y Aplicaciones.
Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 1998
- c) Prácticas de Laboratorio de Transferencia de Masa.
Ediciones Facultad de Química U.N.A.M.
- d) Welty James R
Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa.
Ed. Limusa 1990

Esperimento 5.
CURVA DE INUNDACIÓN

.....

1. OBJETIVO

Observar y determinar experimentalmente los flujos de inundación en una torre empacada para obtener la curva de inundación.

2. TEORÍA BÁSICA

La transferencia de masa en los procesos difusionales, depende en gran parte del área de la superficie de contacto entre las fases, es decir, que entre más interfase exista se tendrá mayor transferencia de masa.

Existen varias formas de aumentar el área de contacto entre las fases y casi todas se basan en subdividir alguna de las fases. Por ejemplo si se atomiza un líquido al pasar por una tobera, ésta dividirá la fase líquida en un gran número de gotas las cuales constituyen el área interfacial a través de la cual se transfiere la masa. El principal problema en estos equipos reside en mantener las pequeñas gotas suspendidas en la otra corriente. esto generalmente se soluciona rellenando el equipo, que comúnmente es un cilindro, con piezas llamadas empaques. El empaque permite disponer de una gran área de contacto íntimo entre las fases.

Uno de los equipos más usados en las operaciones de transferencia de masa, es la llamada torre empacada, que está constituida de un cilindro vertical lleno de pequeñas piezas de diferentes formas geométricas, sostenidas por soportes a uno o varios niveles, provistas de redistribuidores. La función primaria de este equipo es proporcionar un esqueleto sobre cuya superficie escurre la fase pasada en películas delgadas o corrientes, mientras que la ligera asciende a través de los empaques y alrededor de los mismos.

La fase pesada es siempre un líquido y la ligera puede ser un gas (absorción, desorción, humidificación); un vapor (destilación) o un líquido ligero inmiscible con el pesado (extracción líquido).

En estas torres la fase pesada fluye por gravedad, ya que se alimenta por la parte superior de la torre, y la fase ligera se alimenta por la parte inferior, ésta tiende a subir por diferencia de densidades o bien por existir una mayor presión en la base del equipo.

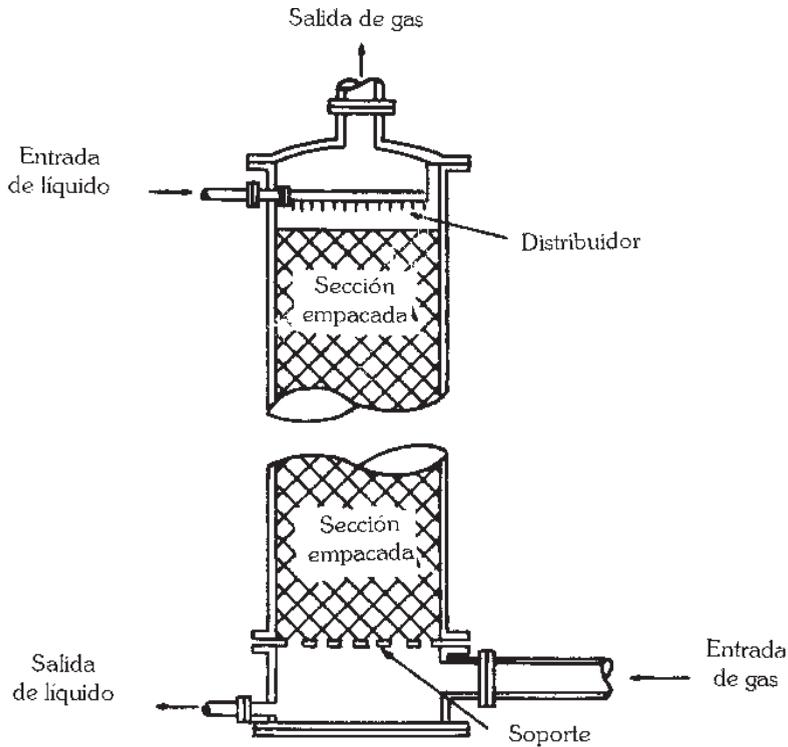


Figura 1. Torre Empacada

Las torres empacadas para destilación, generalmente poseen un diámetro que varía entre 0.1 a 6.0 m., con alturas que van desde 1 hasta 25 m.

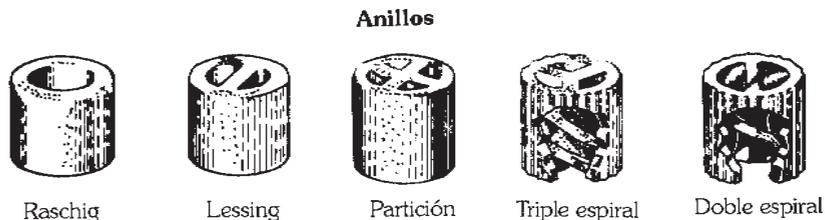
En las torres empacadas el empaque se puede colocar al azar o siguiendo un ordenamiento: Para el diseño de una torre empacada, es necesario tener información sobre los coeficientes de transferencia de masa, los cuales dependen de la cantidad de flujo de las fases, de las concentraciones de éstas y del área interfacial; ahora bien, existe el inconveniente que esta área es difícil de medir y de ahí que suelen utilizarse coeficientes volumétricos, tales como $K_G a$, $K_L a$, etc., con dimensiones de $\text{kg mol transferido por m}^3$ de volumen de torre, por hora y por unidad de fuerza directora.

El término 'a' representa el área superficial por m^3 de empaque, es evidente que el término $K_G a$ incluye un factor inherente que indica la proporción del área empacada que es realmente usada en la transferencia. La proporción del área efectiva es una función del flujo de las fases, el tipo de empaque, el acomodo de éste, etc. Por todo lo anterior, el valor de los coeficientes volumétricos se obtienen experimentalmente.

Empaques

La parte principal de una torre empacada, es precisamente el relleno o empaque. Se han utilizado gran cantidad de materiales para empacar torres, dentro de éstos están, pedacera de vidrio, piedras porosas, carbón, etc. Estos materiales son baratos, pero su principal desventaja estriba en encontrar los coeficientes volumétricos en equipos que contengan este tipo de empaques, coeficientes que solamente pueden encontrarse en forma experimental. Este ha sido el motivo de que se empleen con preferencia empaques con geometría definida y reproducible, los que han sido estudiados por un gran número de investigadores; sus características se encuentran tabuladas y sus resultados son reproducibles.

La figura 2 muestra algunos de los empaques más conocidos.



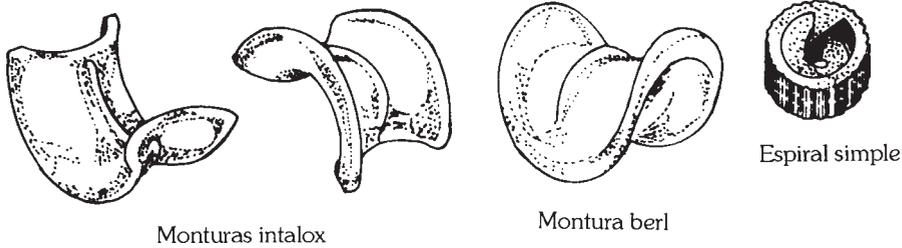


Figura 2.

La colocación del empaque en la columna pueden hacerse en forma ordenada y dando diferentes arreglos, lo que implica un aumento considerable en el costo de instalación por mano de obra. Esto mejora la distribución del líquido, el cual fluye en forma vertical casi en su totalidad. La otra forma es meter el empaque a granel, ya con la columna seca o mojada.



Figura 3a. Arreglo diamante

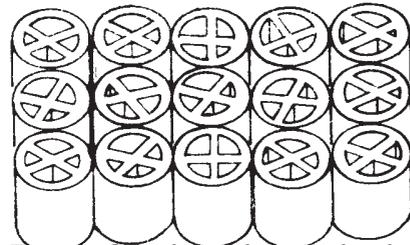


Figura 3b. Arreglo cuadrado

Las propiedades que es deseable tengan los empaques son:

- a) Gran área superficial por unidad de volumen.
- b) Gran cantidad de huecos, para permitir el paso de las corrientes.
- c) Bajo costo.
- d) Baja densidad y alta resistencia a la compresión.
- e) Bajas caídas de presión.

El requerimiento de buen contacto entre las fases es el más difícil de encontrar, especialmente en torres grandes. Idealmente la fase pesada, una vez distribuída en lo alto del empaque, fluye en películas sobre la superficie de éste hacia abajo del equipo. En la práctica, esta película se hace cada vez más y más gruesa, especialmente en ciertas zonas, de manera que el líquido se junta formando corrientes y fluye a través de pasajes del empaque de la torre.

A bajos gastos de fase pesada, la mayor parte del empaque puede estar seca o cubierta con líquido estacionario. Todo ésto se conoce como acanalamiento y es la principal razón de la baja eficiencia de las torres empacadas. Esta eficiencia puede mejorarse si se selecciona un adecuado sistema de distribución de la fase pesada y esta solución de factores tales como, tipo de empaque y diámetro de la torre.

Las figuras 4a y 4b muestran algunos tipo de distribuidores.

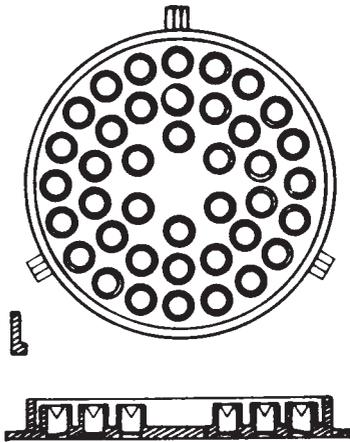


Figura 4a.
Distribuidor de vertederos

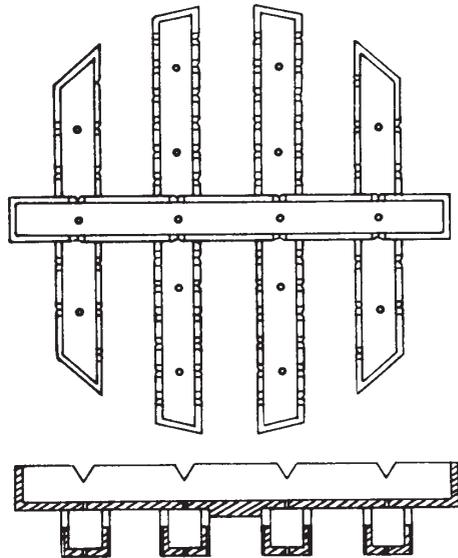


Figura 4b.
Distribuidor de canales

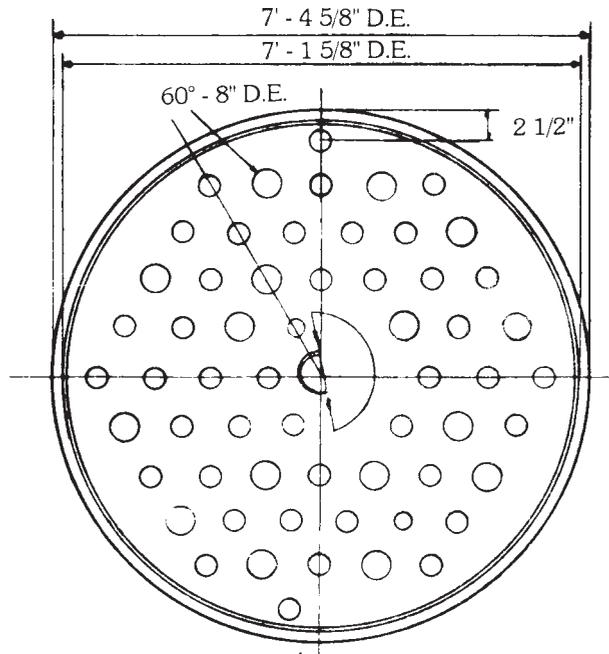


Figura 4c. Plato distribuidor

Otra solución para mejorar la distribución de la fase pesada es el uso de redistribuidores, cuya colocación depende de las dimensiones de la columna haciendo con ésto que se mejore la eficiencia de la misma.

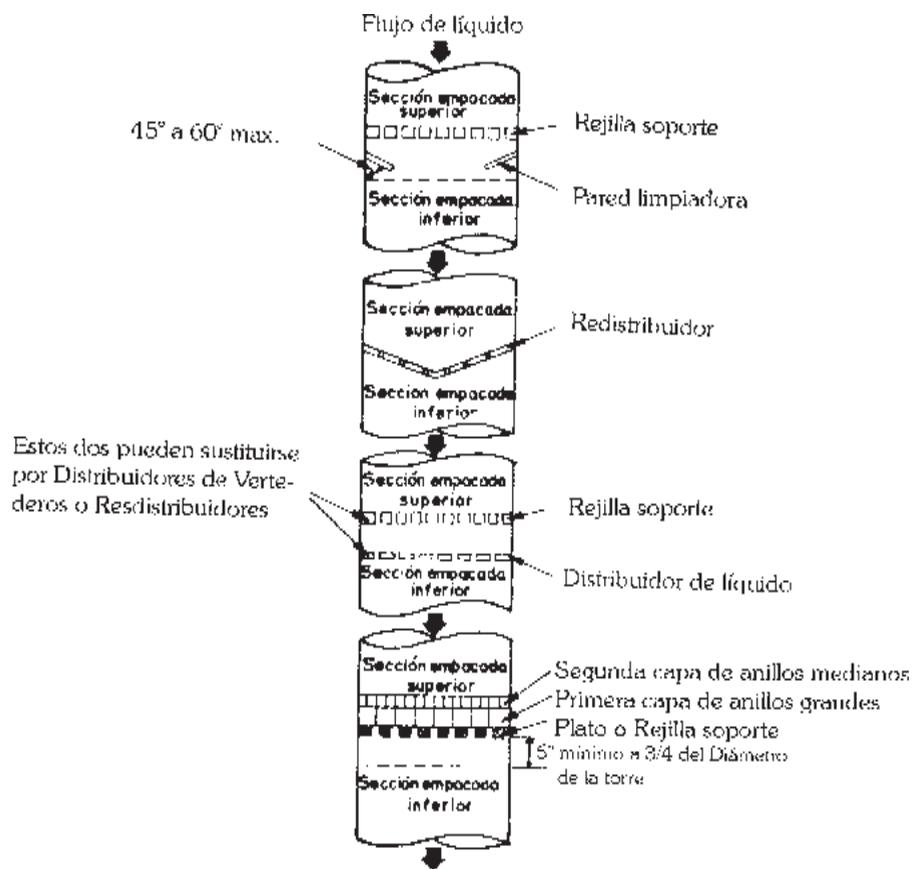


Figura 5.

Características físicas del empaque

Entre las características del empaque que son necesarias para el diseño de una torre, están:

- a) Porcentaje de huecos, E %
- b) Área específica, $a \text{ m}^2/\text{m}^3$
- c) Número de piezas por m^3
- d) Densidad aparente, $\rho_a \text{ Kg}/\text{m}^3$

Estas características se pueden determinar experimentalmente y han sido tabuladas, encontrándose en los libros sobre transferencia de masa.

Relleno	Tamaño nominal pulgadas	Número por m^3	Superficie específica $a \text{ m}^2/\text{m}^3$	Porosidad % ϵ	$a/\epsilon \text{ m}^2/\text{m}$
Anillos Raschig Acero	3	1720	72	94	87
	2	5420	102	94	123
	1	44600	206	93	258
	1/2	354000	416	91	555
Anillos Raschig Grafito	3	1560	62	78	131
	2	5290	95	74	236
	1	52200	87	74	464
	1/2	338000	373	74	925
Anillos Raschig Cerámica	4	733	52	74	129
	2	5420	95	73	245
	1	43000	190	71	532
	1/2	335000	368	71	1030
	1/4	2870000	795	72	2140
Monturas Berl Cerámica	2	8600	115	77	253
	1	71700	243	70	708
	1/2	510000	465	66	1620
	1/4	4620000	1150	65	4200

Inundación

Para una torre que contiene un empaque y que está irrigada con un cierto flujo de fase pasada, existe una velocidad límite al flujo de la fase ligera. La velocidad de la fase ligera correspondiente a este límite, se conoce como velocidad de inundación.

La figura 6 muestra la relación entre las caídas de presión y el flujo de la fase ligera en una torre. La caída de presión por altura de empaque se grafica en coordenadas logarítmicas contra el flujo de la fase ligera en las mismas coordenadas. Cuando el empaque sólo tiene la fase ligera, la línea que se obtiene es recta, línea a' -a'', o sea que la presión aumenta con la velocidad. Si por el empaque se deja caer también la fase pesada a un flujo constante, la relación entre las caídas de presión y el flujo de gas sigue una línea igual a la marcada en la gráfica.

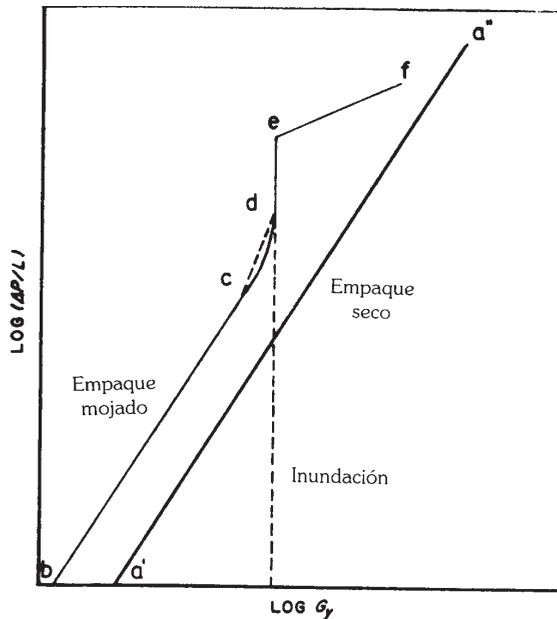


Figura 6. Caída de presión en Torre empacada

A bajas velocidades de la fase ligera la caída de presión sigue el comportamiento de la línea recta, pero la caída de presión para un mismo gasto, es mayor en caso de empaque seco, debido a que la torre contiene también a la fase pesada y el aire de paso por la fase ligera es menor y cuyo valor puede llegar hasta el punto 'c' de la gráfica.

A mayor velocidad, zona 'c - d - e' la caída de presión aumenta rápidamente. Al llegar a esta zona el contenido de líquido en la torre aumenta hasta inundar la torre en el punto 'e', en ese punto cesa la operación de la torre pues el líquido es eliminado por arrastre al ser introducido por el domo de la torre.

Una torre empacada es práctica solamente a velocidades por debajo del punto "c" llamado también punto de carga. Al ser menor la velocidad, menor será el costo de la potencia y menor será la torre, el punto económico de la velocidad más favorable de fase ligera es generalmente de un 60% del valor de la inundación.

Cálculo de la inundación

La observación de la inundación se llevará a cabo por medios visuales ó midiendo las caídas de presión, sin embargo, es posible reproducirlas por medio de correlaciones.

Las velocidades de una y otra fase en una torre que llega a inundarse son función una de la otra, al mismo tiempo la relación mencionada está en función de las propiedades de ambas fases, densidad, viscosidad, las características del empaque, fracción de volumen libre, la superficie que presente, porosidad y volumen de cama empacada.

Para sistemas líquido gas, la correlación más importante es la de Lobo que se obtuvo con los datos experimentales de varios empaques y sistemas. La gráfica de Lobo, figura 7, es una gráfica generalizada que incluye información suficiente. El hecho de que la línea de la figura tenga pendiente negativa a grandes valores de L/G , significa que esta región G_2 se grafica contra G o que L es constante. En otras palabras, al aumentar la velocidad del líquido se alcanza un punto en el cual un pequeño aumento de L es suficiente para impedir que el gas fluya a través del empaque a contracorrientes.

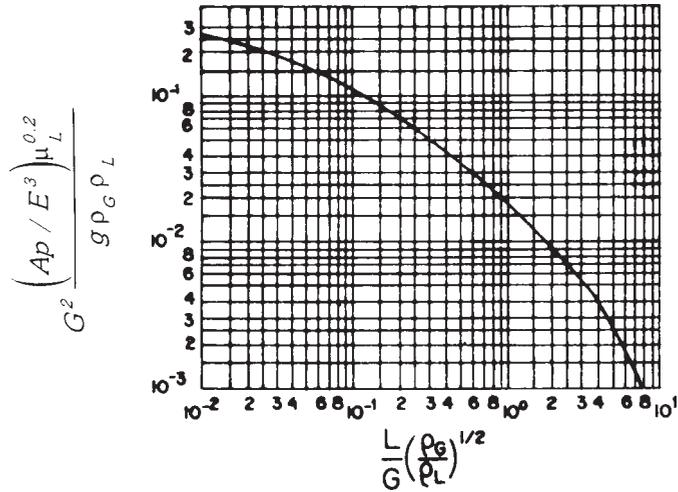


Figura 7. Gráfica de Lobo

Donde: $L = \frac{\text{Kg líquido}}{\text{hr m}^2}$

$P_G = \text{densidad del gas } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

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

$P_L = \text{densidad del líquido } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

$E = \text{fracción de huecos}$

$A_P = \text{área específica } \text{m}^2 / \text{m}^3$

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL REQUERIDO

- Vernier
- Probeta de 500 ml
- Balanza granataria
- Empaques anillos rashig de vidrio o de cerámica

3.2 SERVICIOS AUXILIARES

- Aire comprimido

3.3 SUSTANCIAS O CORRIENTES DE PROCESO

- Aire comprimido
- Agua coloreada con fluoresceína

3.4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

<i>Clave</i>	<i>Equipo</i>	<i>Especificaciones</i>
TA-1	Columna empacada QVF	Servicio: contactar aire-agua Diámetro exterior: 8.8 cms. Diámetro interno: 7.6 cm Altura empacada: 145 cm Material de construc. : Vidrio Marca: QVF Empaque: Anillos rashig de cerámica
FA-1	Tanque de almacenamiento	Servicio: Almacenamiento el agua o alguna solución. Capacidad: 142 litros Diámetro: 48 cm Material de construcción: PVC
FA-2	Tanque de almacenamiento	Servicio: Recolección de agua Capacidad : 64 litros Material de construcción: PVC Altura: 68 cm. Diámetro 35 cm.
FA-3	Tanque de balance	Servicio: Almacenamiento de agua Capacidad: 5.5 litros Material de construcción: Vidrio

GA-1 Bomba centrífuga

Servicio: Alimentar la solución

Tipo: Magnética.

Impulsor de paletas de álabes rectos de 3" de diámetro

Capacidad: 10 lts /min

Pot:1/2 Hp

Material: Polipropileno

Motor: Potencia de 1/5 HP

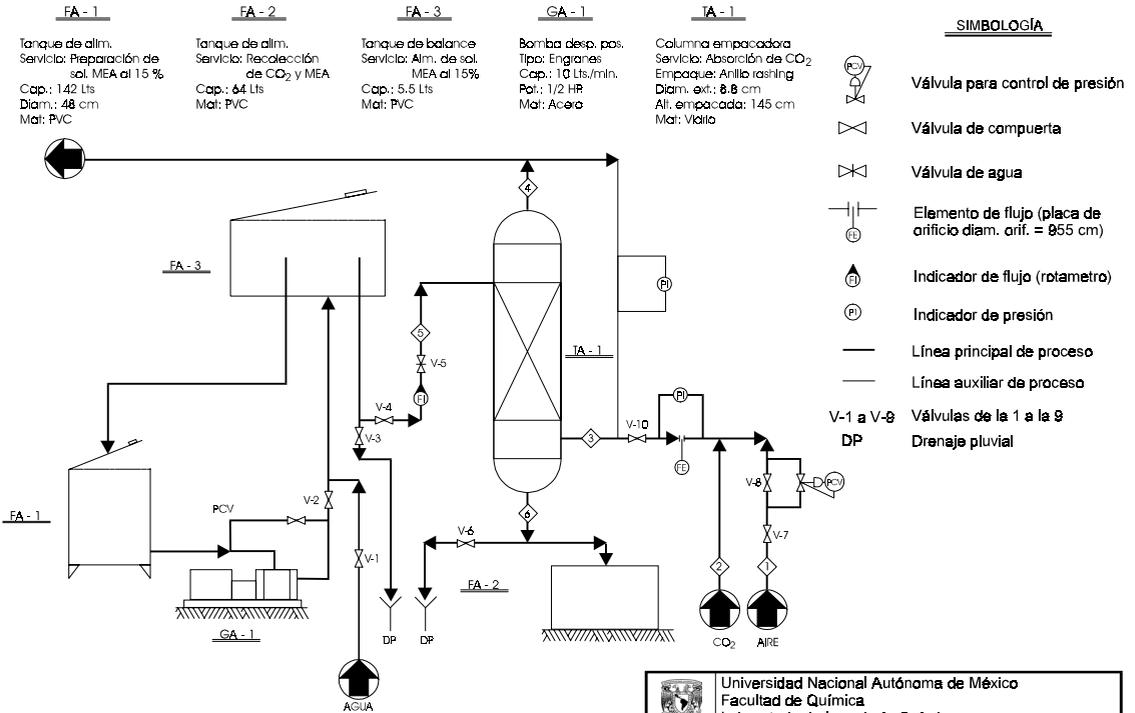
3000 RPM

115Volts.60 Hertz

Nota: También se cuenta con la columna empacada Pignat para hacer esta práctica

(vea la descripción del equipo y el diagrama de flujo en Absorción de dióxido de carbono)

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO



Corriente	①	②	③	④	⑤	⑥
Fluido	Aire	CO ₂	CO ₂ + Aire	CO ₂ + Aire	MEA 15%	MEA + CO ₂
Flujo *						

* Determinar experimentalmente

	Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química Laboratorio de Ingeniería Química
	Diagrama de Flujo Torre empacadora QVF
	Diseño: GLA Revisó: MLGP Elaborado: ARAB ARQ
	FQ - DF - 100
	Revisión (0)

3.6 TÉCNICA DE OPERACIÓN

Técnica de operación para empaque seco

Columna QVF

1. Haga funcionar la compresora y abra las válvulas V-7 y V-8 para purgar la línea de aire.
2. Abra las válvulas de control de presión V-9 y fije una presión de 1 Kg/cm².
3. Con la válvula V-10 alimente un flujo de aire cada 2 cm de H₂O medido en el manómetro diferencial de la placa de orificio (FE).
4. Continúe incrementando el flujo de aire cada 2 cm de H₂O hasta llegar a 20 cm de H₂O.
5. Para cada posición en el manómetro del orificio lea la diferencia de presión de la columna en el manómetro diferencial (PI-2).

Técnica de operación para empaque húmedo

Verifique que la línea de retorno de agua del tanque FA-3 esté dentro del tanque FA-1.

1. Abra la válvula V-1 de suministro de agua el equipo con esto se alimenta el tanque FA-3 colocado en la parte superior de la columna.
2. Espere a que el tanque FA-1 esté lleno a tres cuartas partes de su capacidad total.
3. Cierre la válvula V-1
4. Alimente agua del tanque FA-1 al tanque FA-3 mediante la bomba GA-1 y abriendo la válvula V-2 espere a que el flujo sea continuo.
5. Alimente agua a la columna, abra la válvula V-4 y controle el flujo de agua en el rotámetro F1 con la válvula V-5; Verifique que la válvula V-3 de descarga al drenaje esté cerrada.
6. Establezca un flujo de agua constante y alimente aire como lo hizo del punto 3 al punto 4 de empaque seco.

7. Para cada posición en el manómetro de orificio lea la diferencia de presión en el manómetro de la columna hasta donde la inundación lo permita.
8. Repita el punto 6 y 7 para cada flujo de agua recomendado.

Técnica de operación para empaque seco

Columna PIGNAT

1. Encienda la compresora y revise la línea de aire hasta la válvula V-1 de entrada de aire al equipo.
2. Verifique que el regulador de aire colocado en el equipo, marque una presión de un bar.

Nota: Abra la válvula V-4 de salida de aire a la atmósfera.

3. Alimente aire y controle el flujo con la válvula del rotámetro V-2, desde un valor de 10 por ciento, y anote la caída de presión registrada en la columna, repita la operación, para otra posición del rotámetro, anote la caída de presión respectiva, repita así sucesivamente hasta llegar a un flujo de aire máximo de 90 por ciento en la escala del rotámetro del aire.

Técnica de operación para empaque húmedo

Una vez terminado el experimento para empaque seco, se cierra la válvula del rotámetro de aire V-2 y se procede de la siguiente manera:

4. Llene el tanque de alimentación con agua y agréguele un poco de fluoresceína.
5. Abra la válvula de descarga de agua V-4 colocada en la parte inferior de la columna para que regrese el agua al tanque de alimentación.
6. La corriente de agua debe recircular durante todo el experimento.
7. Suba el switch de suministro de energía eléctrica, conecte la bomba de alimentación de agua.
8. Elija en la bomba, la frecuencia de impulsos, coloque este entre 80-85.

9. Elija con la perilla del potenciómetro, la posición para obtener el flujo deseado.

10. Encienda la bomba y alimente el agua a un flujo constante según la tabla de flujos recomendados.

Precaución: Apague la bomba antes de modificar el valor de la frecuencia o del potenciómetro.

11. Alimente aire a un flujo mínimo de 10 por ciento, abriendo la válvula de control del rotámetro de flujo de aire V-2, a través de la escala, como se hizo en empaque seco, a cada flujo de aire mida la caída de presión en la columna.

Paro del equipo:

a) Apague la bomba y desconéctela, baje el switch de energía eléctrica.

b) Cierre las válvulas de suministro de aire y apague la compresora.

Determinación de las propiedades físicas de los empaques

· Anillos rashig de cerámica para la columna QVF.

· Anillos rashig de vidrio para la columna Pignat.

a) No. de piezas por m³. Llene con el empaque una probeta hasta un volumen determinado y cuente los empaques contenidos en dicho volumen.

b) Densidad aparente y densidad real. Una vez llena la probeta con un volumen determinado de empaque, determine su masa. Con el peso del empaque por unidad de volumen y el % de huecos, que se calcula en el siguiente punto, se obtienen las densidades.

c) Porcentaje de huecos. Con la misma probeta llena de empaque hasta un cierto volumen, agregue de preferencia un volumen igual de agua, mida el volumen que ahora marca la probeta con el agua y el empaque. El agua ocupará el volumen libre que deja el empaque, por lo tanto, obteniendo la relación correspondiente, se conocerá el % de huecos.

d) Área específica. Mida cuidadosamente con un calibrador Vernier las dimensiones necesarias para calcular el área de una pieza de empaque y multiplique éste valor por el no. de piezas contenidas en un m³.

4. FORMATO PARA LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

CONSTANTES FÍSICAS DEL EMPAQUE			
	ANILLOS DE VIDRIO	ANILLOS DE CERÁMICA	OTROS
Masa, kg			
Volumen, m ³			
Superficie, m ²			
ρ_a , kg/m ³			
ρ_r , kg/m ³			
área asp, m ² /m ³			
% huecos			
No piezas/m ³			

	FLUJOS l/min		ΔP
	AGUA	AIRE	COLUMNA cm H ₂ O
EMPAQUE SECO			
EMPAQUE HÚMEDO			

Grupo _____ Fecha _____ Profesor _____

OBSERVACIONES _____

5. CONTENIDO DEL INFORME DE LA PRACTICA

- a) Título
- b) Objetivo
- c) Descripción del proceso
- d) Representación del proceso en un diagrama de flujo
- e) Formato con los resultados experimentales
- f) Desarrollo de los cálculos con:
 - El valor de las constantes físicas de los empaques
 - Las gráficas log - log de caída de presión en la columna contra flujo de la fase gaseosa para empaque seco y húmedo.
 - La curva de inundación experimental construida a partir de la correlación de Lobo.
- g) Análisis y tendencias de resultados
- h) Conclusiones y recomendaciones
- i) bibliografía

6. CUESTIONARIO

1. Enuncie algunos tipos de empaque.
2. ¿Qué finalidad tienen los empaques en una torre empacada?
3. Enuncie algunas características de los empaques.
4. ¿De qué depende la caída de presión en una torre empacada?
5. ¿a qué se le llama inundación?
6. ¿Qué es punto de carga?
7. ¿Es conveniente trabajar cerca de la inundación? ¿por qué?
8. ¿Qué gráfica predice la inundación en sistemas gas-líquido?
9. ¿Cómo varía la caída de presión con el gasto de aire en las torres empacadas?
10. ¿Cómo se calcula el diámetro de una torre empacada?
11. Indique cómo trabajan los platos distribuidores y de qué forma son.
12. ¿En qué casos se deben poner redistribuidores en una torre empacada?
13. Indique qué tipos de platos soporte conoce.
14. ¿Para qué tipos de operación sirven las torres empacadas?

7. NOMENCLATURA

$$L = \frac{\text{Kg líquido}}{\text{hr m}^2}$$

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

E = fracción de huecos

$$P_G = \text{densidad del gas } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_L = \text{densidad del líquido } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$A_p = \text{área específica } \text{m}^2 / \text{m}^3$$

8. BIBLIOGRAFÍA

- a) R.E. Treybal
Mass Transfer Operations
Mc Graw Hill
1998
- b) Leva
Tower Packing Design 61
1980
- c) Foust Wenzel
Principles of Unit Operations
John Wiley & Sons
New York 1992
- d) Joaquín Ocon G., Gabriel Tojo B.
Problemas de Ingeniería Química
Aguilar S. A. de Ediciones
1990
- e) Ernest E. Ludwing
Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants
Vol. 2 Gulf Publishing Company

Experimento 6.
**ABSORCIÓN DE DIÓXIDO
DE CARBONO**

.....

1. PROBLEMA

Encuentre el flujo en Kg/hr de solución de monoetanolamina al 15% en peso, que se debe alimentar a una torre empacada con anillos rashig, para que se absorba el 60% del dióxido de carbono, contenido en una corriente de aire.

2. TEORÍA BÁSICA

(Consultarla en fuentes bibliográficas)

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL REQUERIDO

- · Soporte Universal.
- · Pinzas para bureta.
- · Una bureta.
- · 4 vasos de precipitados de 100 ml.
- · 4 matraces Erlenmeyer.
- · 2 pipetas de 3 ml.
- · Jeringa de 3 ml.
- · Cronómetro

3.2 SERVICIOS AUXILIARES

- Energía eléctrica
- Aire comprimido

3.3 SUSTANCIAS O CORRIENTES DE PROCESO

- Mezcla de CO₂ - aire entre 20-30% en peso.
- Ácido clorhídrico reactivo analítico al 1 normal.
- Indicador de fenoftaleína.
- Solución de monoetanol amina MEA al 15% en peso.

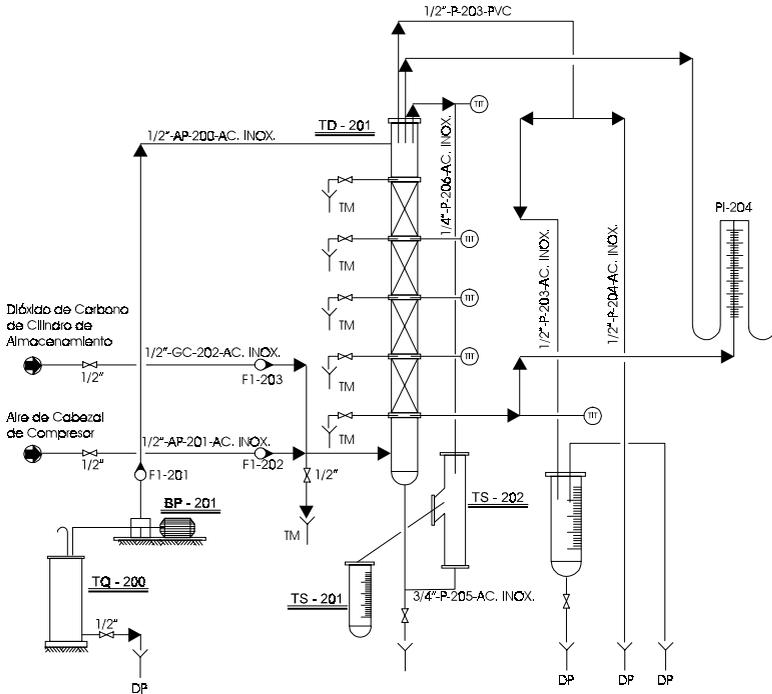
3.4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Clave	Equipo	Especificaciones
TD -202	Columna empacada	Servicio: Absorción de CO ₂ Operación: contracorriente Marca Pignat Diámetro interno:5.08 cm Altura empacada:106 cm Mat. de construcción: Vidrio Plato de alimentación: Acero Inoxidable Plato de soporte: Acero inoxidable Empaque:Anillos rashig de vidrio
BP - 201	Bomba de desplazamiento positivo	Tipo: Dosificadora, magnética Capacidad: Cabeza total Accionador: Motor eléctricoVolts/fase ciclos: 110 / 1 /60 BHP RPM Mat. De construcción: PTFE(teflón)

TQ - 200	Tanque de alimentación	Capacidad: 30 litros Longitud: 50 cm Lado: 30 cm Mat. De construcción: polietileno
TS -. 201	Tanque recibidor	Servicio: Recibo de solución diluida Capacidad : un litro Diámetro: 8 cm. Altura: 45 cm. Mat.de construcción: vidrio/acero inox.
TS - 202	Tanque recibidor	Servicio: Descarga de producto Capacidad: 3 litros Diámetro:13 cm. Altura:50 cm. Mat. de construcción: Vidrio/acero inox.

Nota: Este experimento se puede realizar también en la columna empacada marca QVF (vea la descripción del equipo y el diagrama de flujo en Curva de Inundación)

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO



TANQUE DE ALIMENTACIÓN

Clave: TQ-200
 Capacidad: 20 lts
 Diámetro:
 Longitud:
 Material de construcción: Polietileno

BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Clave: BP-201
 Tipo: 1
 Capacidad:
 Mat. de construcción: PTFE (teflón)
 Accionador: Motor eléctrico
 BHP:
 RPM:
 Volts / Fases / Ciclos: 110/1/60

COLUMNA EMPACADA

Clave: TD-202
 Servicio: Absorción de CO₂
 Operación: Contracorriente
 Diámetro:
 Altura: 1000 mm
 Mat. de construcción: Vidrio
 Empaque: Anillos Raschig 6"6
 Plato de Alimentación: AC. Inox.
 Plato Soporte: AC. Inox.

TANQUE RECIPIENTE

Clave: TS-201
 Servicio: Recibo de agua
 Capacidad: 1 lts
 Diámetro:
 Altura:
 Mat. de construcción: Vidrio / AC. Inox.

TANQUE RECIPIENTE

Clave: TS-202
 Servicio: Descarga de producto
 Capacidad: 3 lts
 Diámetro:
 Altura:
 Mat. de construcción: Vidrio / AC. Inox.

SIMBOLOGÍA

Ⓜ Indicador transmisor de temperatura

	Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química Laboratorio de Ingeniería Química
	Diagrama de tuberías e instrumentos Torre empacadora Pignat
	Diseño: GLA Revisó: MLGP Elaborado: ARAB ARQ
	FQ - DF - 100
	Revisión (0)

3.6 TÉCNICA DE OPERACIÓN

a) Desarrollo experimental para la columna Pignat

1. Arranque la compresora y revise la línea de aire hasta la válvula V-1 de entrada de aire del equipo.
2. Verifique que el regulador de aire colocado en el equipo, marque una presión de un bar.

Nota: Abra la válvula V-3 de salida de aire a la atmósfera.

3. Alimente aire y controle el flujo con la válvula del rotámetro V-2, a la entrada, entre 20 y 40% en la escala.
4. Abra la válvula maestra del tanque de CO_2 verifique que las válvulas hasta el rotámetro de CO_2 estén abiertas, controle el flujo con la válvula del rotámetro de entrada V-6, entre 30 y 90 mm en la escala.
5. Determine, la composición de la corriente gaseosa por cromatografía (ver la técnica de operación del cromatógrafo en el anexo), tomar la muestra de la válvula de purga V-7 (justo antes de la entrada a la columna), la composición debe estar entre 20 y 30% en peso de dióxido de carbono.
6. Verifique que el tanque de alimentación contiene solución de MEA al 15% en peso mediante titulación con HCl 1N.
7. Suba el switch de suministro de energía eléctrica conecte, y encienda la bomba de alimentación de solución.

Precaución: Apague la bomba antes de modificar el valor de la frecuencia o la posición de la perilla del potenciómetro.

9. Elija en la bomba, la frecuencia de impulsos, coloque este entre 80-85.
10. Elija con la perilla del potenciómetro, la posición entre 25 y 50 para obtener el flujo de líquido entre 3 y 7 l/h.

11. Abra la válvula de descarga de líquido V-4, colocada en la parte inferior de la columna.
12. Alimente la solución a un flujo constante según los flujos recomendados .
13. Tome una muestra de la corriente gaseosa de salida del equipo y analícela por cromatografía.

Nota: Consulta la técnica de operación del cromatógrafo en el apéndice.

14. Analice la corriente líquida de salida, por medio de titulación con HCl 1 N, usando como indicador fenolftaleína.

Paro del equipo:

15. Apague la bomba y desconéctela, baje el switch de energía eléctrica.
16. Cierre la válvula de suministro de CO₂.
17. Cierre las válvulas de suministro de aire y apague la compresora.

b) Columna QVF

1. Prepare una solución de monoetanolamina (MEA) al 15% en peso en el tanque FA-1.
2. Alinie el suministro de aire desde la compresora, hasta la válvula para control de presión V-9.
3. Controle una presión de 0.5 Kg/cm² en la válvula de control V-9.
4. Alimente una corriente de mezcla gaseosa de aire-CO₂ de la siguiente manera:

- a) Fije con la válvula V-10, una diferencia de presión para la alimentación de aire de 40-80 mm de H₂O, en el manómetro de la placa de orificio P1-1.
 - b) Abra la válvula maestra del tanque de CO₂.
 - c) Alimente el CO₂ manteniendo con la válvula de control del tanque una diferencia de presión de 2-7 mm de H₂O, en el manómetro P1-1.
5. Después de pasar por la columna, se descarga, la corriente de gas a la atmósfera.
 6. Determine la composición de CO₂ de la corriente gaseosa alimentada por cromatografía.
 7. Alinee la bomba GA-1 de alimentación de solución de MEA, desde el tanque de mezcla FA-1, hasta la válvula V-5 de control de flujo de corriente líquida.
 8. Seleccione el flujo de la corriente líquida, colocando el flotador del rotámetro F1 en la posición de 0.3- 0.7
 9. Reciba, la corriente líquida de salida de la columna, en el tanque FA-2.
 10. Mantenga las corrientes a flujo constante y después de cinco minutos: Analice el contenido de CO₂ de la corriente gaseosa de salida, como se hizo en el punto 6.

Paro del equipo

11. Cierre la válvula maestra del cilindro de CO₂ y las válvulas de suministro de aire V-9 y V-10.
12. Apague la bomba de alimentación GA-1 de la corriente líquida.
13. Consulte el diagrama de flujo para la columna empacada QVF en la práctica de curva de inundación.

Nota: Consulte la técnica para el cromatógrafo en el apéndice.

4. FORMATO PARA LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

<i>Corriente Gaseosa</i>	<i>Corriente Líquida</i>
Flujo de aire:	Flujo:
Flujo de CO ₂	Normalidad (N) entrada
Concentración CO ₂ de entrada:	Concentración de MEA de entrada
Concentración CO ₂ de salida:	Concentración de MEA de salida

Profesor: _____ grupo _____ fecha _____

Observaciones _____

5. CONTENIDO DEL INFORME DE LA PRÁCTICA

- a) Título
- b) problema
- c) Descripción del proceso
- d) Representación del proceso en un diagrama de flujo
- e) Formato con los resultados experimentales
- f) Desarrollo de los cálculos con :
- g) Cuestionario resuelto

6. CUESTIONARIO

1. ¿De qué propiedades depende la solubilidad de un gas en un líquido?
2. Explica tres formas de expresar la solubilidad de un gas en un líquido.
3. ¿Cómo se relacionan entre sí estas expresiones de solubilidad para las fases gaseosa y líquida.
4. Construye la curva de equilibrio X vs Y para el sistema CO₂-MEA (solución acuosa al 15% en peso y a 585 mmHg. y a la temperatura de operación).
5. Explica qué representa la curva de equilibrio.
6. ¿Con qué criterio se seleccionan los flujos de las corrientes líquida y gaseosa para trabajar en la torre empacada?
7. ¿Qué representa la línea de operación en absorción?
8. ¿Cuál es la concentración de CO₂ en la corriente líquida de salida? Exprésala en relación mol.
9. Para las condiciones de operación alcanzadas traza la línea de operación del proceso junto con la curva de equilibrio del sistema, en el diagrama Y vs X.
10. ¿Cuál es la relación L' / G' de operación?
11. Determina para este experimento ¿cuál es la máxima concentración de CO₂ que se puede obtener en la corriente líquida?.
12. En la realidad es posible obtener esta concentración máxima, si o no, ¿Por qué?
13. ¿Cuál sería el L'/G' óptimo.
14. ¿Qué porcentaje del CO₂ alimentado se absorbió en este experimento?

15. Si se desea llegar a absorber el 60% del CO_2 contenido en la mezcla gaseosa, calcula:

- La relación de flujos líquido-gas de operación para el siguiente experimento.
- El flujo en l/min. de corriente líquida necesaria para llevar a cabo la absorción.

16. Realiza un análisis de los resultados obtenidos.

17. ¿Cuál es finalmente el flujo en kg/hr de solución de MEA alimentada que absorbe el 60% del CO_2 alimentado con la corriente del aire?

7. NOMENCLATURA

N = Normalidad

CO_2 = Dióxido de carbono

HCL = Ácido clorhídrico

L' = Flujo de agua

G' = Flujo de aire

X = Composición de la corriente líquida en mol de CO_2 / mol de agua

Y = Composición de la corriente gaseosa en mol de CO_2 / mol de aire

8. BIBLIOGRAFÍA

- a) Katz, Handbook of Natural Gas Engineering
- b) Mc. Cabe Warren L. and Smith Julian C.
Operaciones Básicas en Ingeniería Química
Ed. Reverté, S.A. México
- c) H. Sawistowski and W. Smith
Métodos de Cálculos en los Procesos de Transferencia de Materia
Ed. Alhambra, S.A. México.
- d) Antonio Valiente y Rudi Primo Stivalet
Problemas de Balance de Materia y Energía
De. Alhambra-Universidad

APÉNDICES

· · · · ·

APÉNDICE DE MOLIENDA Y TAMIZADO

INTERVALO = $\sqrt{2}$ ABERTURA PULGADAS	INTERVALO = $4\sqrt{2}$, PARA TAMIZADO SELECTO			
	ABERTURA PULGADAS	ABERTURA mm.	No. MALLAS	DIAMETRO SELECTO DEL HILO PULGADAS
1,050	1,050	26,67	....	0,148
	0,883	22,43	....	0,135
0,742	0,742	18,85	....	0,135
	0,624	15,85	....	0,120
0,525	0,525	13,33	....	0,105
	0,441	11,20	....	0,105
0,371	0,371	9,423	....	0,092
	0,312	7,925	2 ½	0,088
0,263	0,263	6,680	3	0,070
	0,221	5,613	3 ½	0,065
0,185	0,185	4,699	4	0,065
	0,156	3,962	5	0,044
0,131	0,131	3,327	6	0,036
	0,110	2,794	7	0,0326
0,093	0,093	2,362	8	0,032
	0,078	1,981	9	0,033
0,065	0,065	1,651	10	0,035
	0,055	1,397	12	0,028
0,046	0,046	1,168	14	0,025
	0,0390	0,991	16	0,0235
0,0328	0,0328	0,833	20	0,0172
	0,0276	0,701	24	0,0141
0,0232	0,0232	0,589	28	0,0125
	0,0195	0,495	32	0,0118
0,0164	0,0164	0,417	35	0,0122
	0,0148	0,351	42	0,0100
0,0116	0,0116	0,295	48	0,0092
	0,0097	0,248	60	0,0070
0,0082	0,0082	0,208	65	0,0072
	0,0069	0,175	80	0,0056
0,0058	0,0058	0,147	100	0,0042
	0,0049	0,124	115	0,0038
0,0041	0,0041	0,104	150	0,0026
	0,0035	0,088	170	0,0024
0,0029	0,0039	0,074	200	0,0021
	0,0024	0,061	230	0,0016
0,0021	0,0021	0,053	270	0,0016
	0,0017	0,043	325	0,0014
0,0015	0,0015	0,038	400	0,0010

SISTEMA SÓLIDO-SÓLIDO. SERIE DE MALLAS EQUIVALENTES DE TYLER

Designación de la malla		Abertura de la malla		Diámetro nominal del alambre		Designación, (equiv. de Tyler)
Estándar	Alternativa	mm.	Pulg. (equiv. aprox.)	mm.	(equiv. aprox.)	
107.6 mm. 101.6 mm. 76.1 mm.	4.24 pulg. 4 4 pulg. 3 ½ pulg. 3 pulg. 2 ½ pulg.	107.6 101.6 90.5 76.1 64.0	4.24 4.00 3.50 3.00 2.50	6.40 6.30 6.08 5.80 5.50	0.2520 .2480 .2394 .2283 .2165	
53.8 mm. 50.8 mm. 45.3 mm. 38.1 mm. 32.0 mm.	2.12 pulg. 2 t pulg. 1 ¾ pulg. 1 ½ pulg. 1 ¼ pulg.	53.8 50.8 45.3 38.1 32.0	2.12 2.00 1.75 1.50 1.25	5.15 5.05 4.85 4.59 4.23	.2028 .1988 .1909 .1807 .1665	
26.9 mm. 25.4 mm. 22.6 mm. 19.0 mm. 16.0 mm.	1.06 pulg. 1 t pulg. 7/8 pulg. 2/8 pulg. 5/8 pulg.	26.9 25.4 22.6 19.0 16.0	0.06 1.00 0.875 .750 .625	3.90 3.80 3.50 3.30 3.00	.1535 .1496 .1378 .1299 .1181	1.050 pulg. 0.883 pulg.
13.5 mm. 12.7 mm. 11.2 mm. 9.51 mm. 8.00 mm.	0.530 pulg. ½ t pulg. 7/16 pulg. 2/8 pulg. 5/16 pulg.	13.5 12.7 11.2 8.00	.530 .500 .438 .375 .312	2.75 2.67 2.45 2.27 2.07	.1083 .1051 .0965 .0894 .0815	.525 pulg. .441 pulg. .371 pulg. 2½ malla
6.73 mm. 6.35 mm. 5.66 mm. 4.76 mm. 4.00 mm.	0.265 pulg. No. 3½ No. 4 No. 5	6.76 6.35 5.66 4.76 4.00	.265 .250 .223 .187 .157	1.87 1.82 1.68 1.54 1.37	.0736 .0717 .0661 .0606 .0539	3 malla 3½ malla 4 malla 5 malla
3.36 mm. 2.83 mm. 2.38 mm. 2.00 mm. 1.68 mm.	No. 6 No. 7 No. 8 No. 10 No. 12	3.36 2.83 2.38 2.00 1.68	.132 .111 .0937 .0787 .0661	1.23 0.10 1.00 0.900	.0484 .0430 .0394 .0354 .0319	10 malla
1.41 mm. 1.19 mm. 1.00 mm. 841 micras 707 micras	No. 14 No. 16 No. 18 No. 20 No. 25	1.41 1.19 1.00 0.841	.0555 .0469 .0394 .0331 .0278	.725 .650 .580 .510 .450	.0285 .0256 .0228 .0201 .0177	12 malla 14 malla 16 malla 20 malla 24 malla
595 micras 500 micras 420 micras 354 micras 297 micras	No. 30 No. 35 No. 40 No. 45 No. 50	.595 .500 .420 .354 .297	.0234 .0197 .0165 .0139 .0117	.390 .340 .290 .247 .215	.0154 .0134 .0114 .0097 .0085	28 malla 32 malla 35 malla 42 malla 48 malla
250 micras 210 micras 177 micras 149 micras 125 micras	No. 60 No. 70 No. 80 No. 100 No. 120	.250 .210 .177 .149 .125	.0098 .0083 .0070 .0059 .0049	.180 .152 .131 .110 .091	.0071 .0060 .0052 .0043 .0036	65 malla 80 malla 100 malla 115 malla
105 micras 88 micras 74 micras 63 micras 53 micras	No. 140 No. 170 No. 200 No. 230 No. 270	.105 .088 .074 .063 .053	.0041 .0035 .0029 .0025 .0021	.076 .064 .053 .044 .037	.0030 .0025 .0021 .0017 .0015	150 malla 170 malla 200 malla 250 malla 270 malla
44 micras 37 micras	No. 325 No. 400	0.44 .037	.0017 .0015	.030 .025	.0012 .0010	325 malla 400 malla

APÉNDICE DE FILTRACIÓN A)

Uso de la Tabla 1

1. Localice el área calculada en m^2 en la columna de área efectiva por cámara de metal.
2. Si el área es mayor de las que se encuentran en la tabla se busca un submúltiplo; dividiendo el valor del área entre un número, de modo que el resultado si se encuentre en la tabla.
3. Localizada el área, si lee en la primera columna de la izquierda el tamaño de placa cuadrada en mm.

Ejemplo: área calculada $3.6 m^2$ como éste valor no se encuentra en la tabla; se divide entre 10 obteniéndose un área de $0.36 m^2$. El tamaño de placa cuadrada para éste área es de 457 mm.

Por lo que para un área de $3.6 m^2$ se necesitan 10 placas de 457 mm., o bien 5 placas de 914 mm.

APÉNDICE DE ABSORCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO

a) Técnica de operación del cromatógrafo de conductividad térmica

- 1) Abra la llave del tanque de helio (gas acarreador) a 40 psi.
- 2) Regule los rotámetros de flujo de helio, colocados dentro del estante, para el puerto "A" en 30 y para el puerto "B" en 10.

Nota: Verifique que fluya continuamente helio a los dos rotámetros.

- 3) Conecte a la corriente y encienda el regulador, colocado en la parte inferior del estante.
- 4) Encienda el cromatógrafo, colocado en la parte superior del estante (el botón de encendido se encuentra en la parte posterior derecha del mismo cromatógrafo).
- 5) Encienda el integrador, colocado en la parte media del estante (el botón de encendido se encuentra en la parte posterior izquierda del mismo integrador).
- 6) Programe el cromatógrafo. Para programar oprima el botón en "set", después oprima cualquiera que desee de los botones del inyector, detector y columna (botones A), oprima y gire las perillas (señalados como B).

Por ejemplo, si se oprime el botón A del inyector, oprima y gire la perilla B del mismo inyector hasta la temperatura que se recomienda, después oprima el botón A del detector y oprima y gire la perilla B del detector hasta colocar la temperatura recomendada, hacer lo mismo con la columna y la corriente.

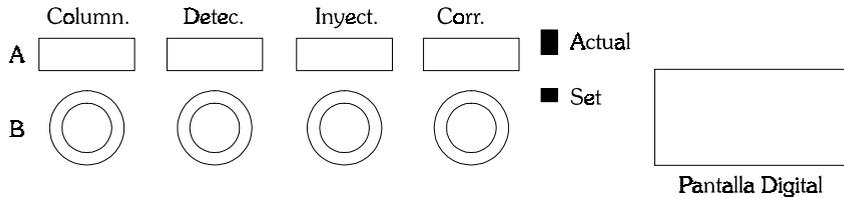
Las temperaturas y corriente recomendadas, son:

T_{COLUMNA} = 70 C

T_{DETECTOR} = 90 C

T_{INYECTOR} = 90 C

Corriente = 60



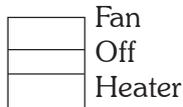
Notas:

1) Coloque el botón en la posición "actual", para leer las temperaturas que tienen la columna, detector o inyector.

2) No olvidar poner la corriente.

7) Verificar que la tapa del cromatógrafo este cerrada.

8) Encender el calentador en la posición de "Heater".



9) Ajuste la línea base con el zero del cromatógrafo, al mismo tiempo oprimir las teclas list zero del integrador y se escribirá.

list zero = 0, & (el & deberá ser cercano a cero, si no lo es, ajuste con la perilla del zero que está en el cromatógrafo y teclee en el integrador list zero para verificar que tiene el valor correcto).

10) En el integrador teclee el valor indicado en la siguiente tabla, después de este valor oprima ENTER:

Tecla Oprimida	Valor Dado
ATT2 ^	3 → Enter
CHT SP	1.5 → Enter
ARREJ	1 → Enter
THRSH	1 → Enter
PK WD	0.1

NOTA: Para asegurarse de que los valores dados han sido introducidos de manera correcta, teclear list, list.

- 11) Espere a que el cromatógrafo alcance la temperatura programada.
- 12) Ajustar línea base con el zero del cromatógrafo, al mismo tiempo oprimir las teclas list zero del integrador y se escribirá:
- 12) Para tiempo de análisis se oprime la tecla TIME, 0.9 y la tecla STOP del integrador.
- 13) Inyecte en el puerto "A" un centímetro de muestra. Inmediatamente después oprimir START en el integrador, repita lo mismo para cada muestra a analizar, dando el tiempo para que el integrador reporte los resultados de la siguiente manera (ejemplo).

TR%	ÁREA	
0.29	90.56148	⇒ % en peso de aire
0.52	9.43852	⇒ % en peso de CO ₂

Apagado del cromatógrafo y equipo

- 1) Apague el integrador.
- 2) Programe el cromatógrafo a las condiciones ambientales (temperatura de la columna, del inyector y del detector a 25 C).
- 3) Apague el calentador "HEATER", colocándolo primero en la posición "Fan" (hacia arriba).
- 4) Abra la tapa del cromatógrafo.
- 5) Espere a que la temperatura de la columna descienda a menos de 35 °C, y coloque el calentador en la posición de "Off".
- 6) Cierre la válvula del tanque de helio y despresurice la línea con la válvula reguladora.
- 7) Apague el cromatógrafo.
- 8) Apague el regulador.
- 9) Desconecte la corriente.

Significado de las abreviaturas

ATT2^: Attenuation, hace más grande o más chico el, o los picos del cromatograma, sus valores van de -8 a 36, entre mayor sea el valor más chico es el cromatograma.

CHT SP: Chart speed, sus valores van de 0 a 30 cm/min, entre más grande sea el valor avanza más papel.

ARREJ: Área rejection, sus valores son números enteros, representan una cantidad de área en 1/8 mV-seg., cada pico debe tener una cantidad arriba de este valor para que sea reportado o almacenado.

THRSH: Threshold, es un nivel de señal abajo del cual el integrador considera todas ñlas desviaciones de la línea base como ruidos, sus valores van de -6 a 28, un pico con elevación menor del Threshold es ignorado.

PK WD: Peak Width, especifica el ancho (en minutos) del pico, sus valores pueden ir de 0.01 hasta 2.5.

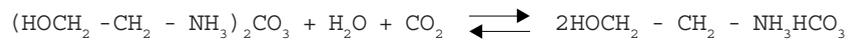
LIST: ZERO: El integrador imprime la *posición, nivel de señal*.

APÉNDICE ABSORCIÓN DE CO₂

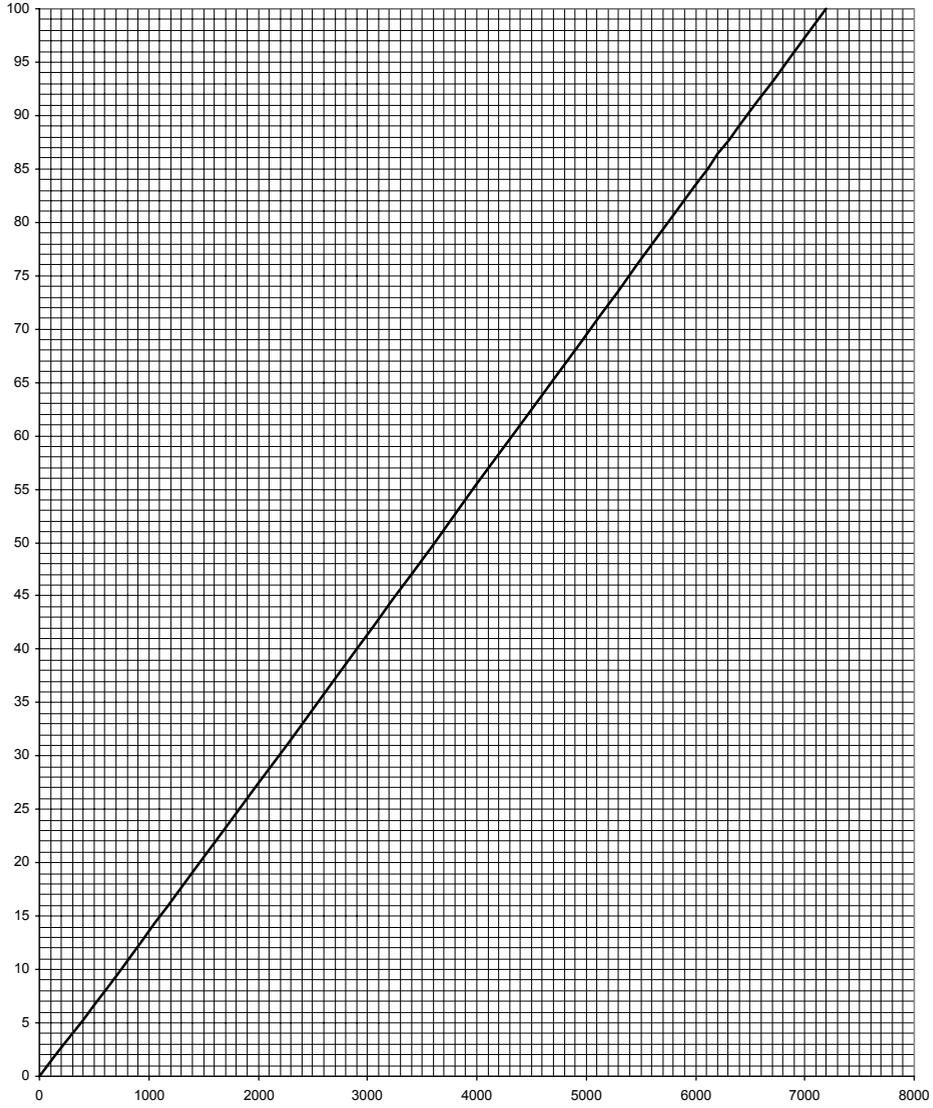
Tabla de propiedades de la Monoetanolamina

FÓRMULA	HO-CH ₂ -CH ₂ -NH ₂
SINÓNIMOS	β-AMINO-ETIL-ALCOHOL ETANOL AMINA, ETANOLAMINA 2 HIDROXI ETILAMINA
PESO MOLECULAR	61.08
CARACTERÍSTICAS	LÍQUIDO ACEITOSO, VISCOSO Y LIGERO CON OLOR AMONIACAL
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE 68/68 F	1.0179
GRAVEDAD ESPECÍFICA/AT	0.00078
PUNTO DE EBULLICIÓN (F) 760 mm Hg 50 mm Hg 10 mm Hg	339 212 156
CALOR ESPECÍFICO A 30 C	0.497 Cal/g C
PRESIÓN DE VAPOR 68 F mm Hg	0.4
PUNTO DE FUSIÓN F	50.9
SOLUBILIDAD A 68 EN AGUA	COMPLETA
DE AGUA EN	COMPLETA
VISCOSIDAD ABSOLUTA A 68 F CENTIPOISES	24.1
ÍNDICE DE REFRACCIÓN A 68 F	1.4544
CALOR DE VAPORIZACIÓN (BTU/lb)	355
TEMPERATURA CRÍTICA C	341.3
PRESIÓN CRÍTICA ATM.	44.1
CONSTANTES PARA LA ECUACIÓN DE ANTOINE	A = 8.02401 B = 1921.6 C = 203.3
USOS	FABRICACIÓN DE JABONES SEPARACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO DE GASES INERTES SÍNTESIS ORGÁNICA DE DETERGENTES
TOXICIDAD	AGENTE ALCALINO PARA LA PLASTIFICACIÓN
DOSIS LETAL POR VÍA ORAL EN RATONES	2.14 A 2.74 mg/Kg
CONTACTO CON LA PIEL EN CONEJOS	1.00 ml/Kg
INHALACIÓN DIRECTA DE LOS VAPORES SATURADOS EN RATONES	DESPUÉS DE 4 HORAS MUEREN 2 DE 6 RATONES
CONTACTO DIRECTO CON LOS OJOS EN CONEJOS	SEVERO

Reacción entre el dióxido de carbono y la monoetanolamina



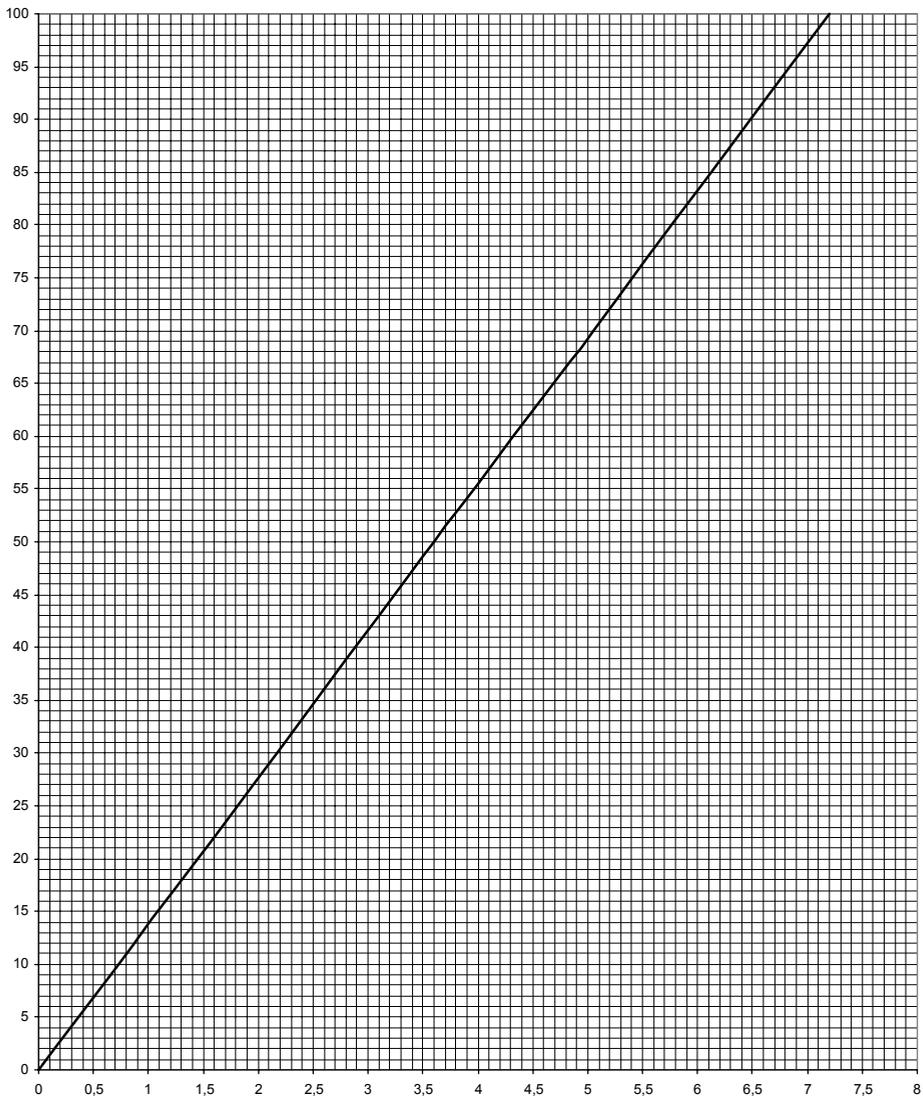
**% flujo máximo
de aire**



$y = 0.0139x - 0.2417$
 $R^2 = 1$

L/h

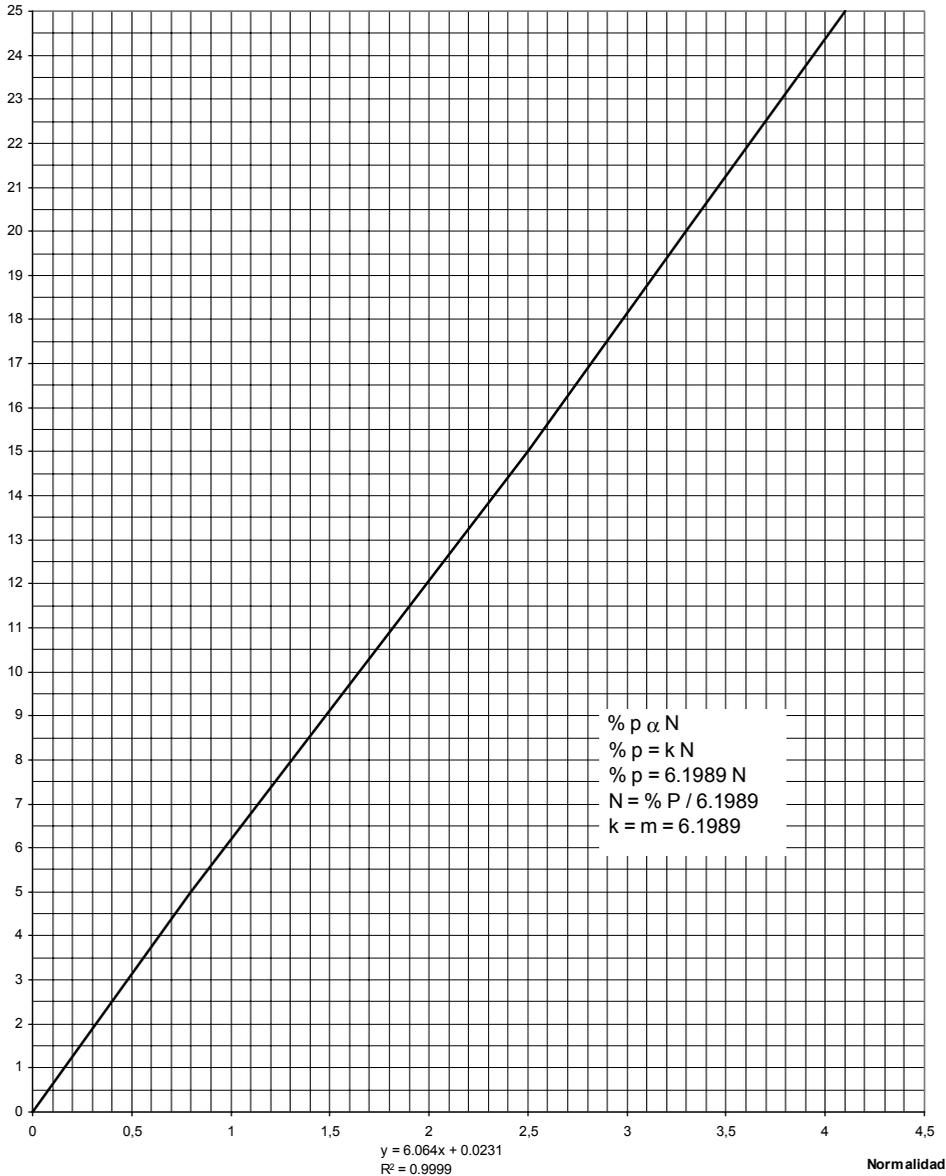
% flujo máximo
de aire



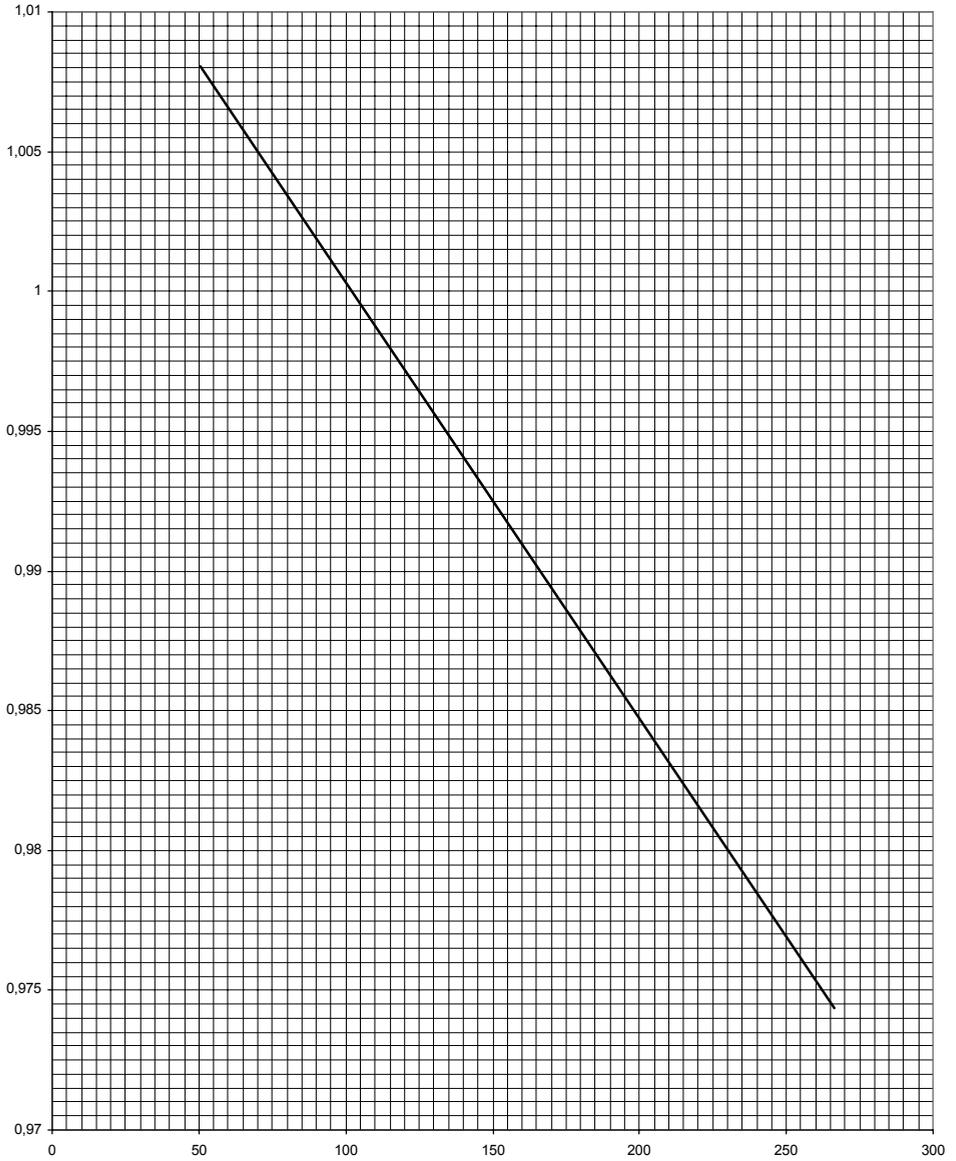
$y = 13.891x - 0.0618$
 $R^2 = 1$

m³/h
STD

% peso
MEA-H₂O



ρ (g/cm³)



$y = -0,0002x + 1,0159$
 $R^2 = 0,9999$

T (°C)

Lectura
(mm)

