

41
29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"DISEÑO DE UNA PRACTICA DE CENTRIFUGACION
PARA EL LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA"



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
CARLOS HERNANDEZ MARTINEZ

MEXICO, D. F.

1989

TESIS CON
FALLA DE CRISIS



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO.

	PAGINA.
CAPITULO I. INTRODUCCION.	1
CAPITULO II. GENERALIDADES.	5
II.1. Principios generales.	5
II.2. Esfuerzos en centrifugas.	9
II.3. Materiales de construccion.	11
CAPITULO III. CLASIFICACION DE LAS CENTRIFUGAS.	12
III.1. Clasificación general.	12
III.2. Clasificación sistemática.	12
III.3. Centrifugas sedimentadoras.	15
III.3.A. Centrifuga Tubular.	16
III.3.B. Centrifuga de cámaras.	17
III.3.C. Centrifuga de tambor no perforado.	20
III.3.D. Decantador centrífugo.	22
III.3.E. Centrifugas de discos.	26
I. Centrifuga de tambor no perforado.	28
II. Centrifuga de toberas.	30
III. Centrifuga autodeslodante.	32
IV. Centrifuga de toberas con válvulas.	34
CAPITULO IV. PRINCIPIOS DE OPERACION Y DISEÑO DE LOS SEPARADORES CENTRIFUGOS.	38
IV.1. Fuerzas acelerantes.	38
IV.2. Teoría de la centrifuga sedimentadora.	39
IV.3. Comparación de centrifugas.	45
IV.4. Separación líquido-líquido.	46
CAPITULO V. FILTRO CENTRIFUGO.	49

CAPITULO VI. CRITERIOS DE SELECCION DE CENTRIFUGAS.	57
VI.1. Introducción.	57
VI.2. Campo de aplicación.	58
VI.3. Tamaño de los sólidos suspendidos.	59
VI.4. Contenido de sólidos en la alimentación.	61
CAPITULO VII. DESCRIPCION DEL EQUIPO.	69
VII.1. Descripción general.	69
VII.2. Montaje del equipo.	76
VII.3. Manual de operación, seguridad y mantenimiento del LWA-205.	76
CAPITULO VIII. PARTE EXPERIMENTAL.	82
VIII.1. Diseño de los experimentos.	82
VIII.2. Desarrollo de los experimentos.	84
CAPITULO IX. EVALUACION Y SELECCION DE LOS SISTEMAS MAS APROPIADOS PARA INCLUIR EN UNA PRACTICA DE CENTRIFUGACION.	96
CAPITULO X. CONCLUSIONES.	99
CAPITULO XI. RESUMEN.	101
ANEXO I. PRACTICA DE CENTRIFUGACION PROPUESTA PARA EL LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA.	103
ANEXO II. NOMENCLATURA	118
BIBLIOGRAFIA.	120

1.1 INTRODUCCION

METODOS DE SEPARACION MECANICA.

Frecuentemente es necesario separar los componentes de una mezcla en fracciones individuales. Estas fracciones pueden diferir de la otra u otras en el tamaño de partícula, en la fase o en la composición química. De esta forma, un producto crudo puede ser purificado por simple remoción de las impurezas contaminantes y dos o más componentes en una mezcla pueden ser separados en las sustancias puras. La corriente descargada de proceso puede consistir en una mezcla de producto crudo y materia sin convertir, la cual debe ser separada con el fin de reciclarla; o una sustancia valiosa como un mineral metálico dispersado en una masa de material inerte que debe ser separada para poder recuperar el material y desechar la masa inerte.

Se han desarrollado una gran cantidad de métodos para llevar a cabo tales separaciones y muchas operaciones unitarias tratan de ellos. Un ingeniero generalmente encuentra problemas de separación y debe ser capaz de elegir el método más adecuado para resolverlos

Los procesos para separar los componentes de una mezcla se dividen en dos clases. La primera incluye técnicas llamadas *Separaciones Mecánicas*, que son útiles para separar mezclas de partículas sólidas ó gotas de líquidos dispersas en otros líquidos o gases. La segunda clase trata de los métodos que dependen de los cambios de fase como condensación, evaporación, disolución, precipitación, etc.

Las separaciones mecánicas son aplicables a las mezclas heterogéneas, no a soluciones homogéneas. La separación se logra usando fuerzas mecánico-físicas y no las fuerzas moleculares o químicas de la difusión. Estas fuerzas mecánico-físicas actúan sobre las partículas, líquidos o mezclas de ambos y no necesariamente sobre las moléculas individuales.

Entre las fuerzas mecánico-físicas podemos considerar la gravitación, la centrifugación, las fuerzas mecánicas propiamente dichas y las fuerzas cinéticas causadas por flujos. Las corrientes de partículas y/o fluidos se separan a causa de los efectos que sobre ellos producen dichas fuerzas.

Estas técnicas se basan en diferencias físicas entre las partículas, tales como tamaño, forma, densidad o características eléctricas o magnéticas. Estas son aplicables a las separaciones de líquidos de líquidos, sólidos de líquidos, líquidos de gases, sólidos de gases y sólidos de sólidos.

En las separaciones mecánicas se usan métodos fundamentalmente diferentes que se pueden complementar en ciertos casos. Por ejemplo, los métodos para separar mezclas de líquidos inmiscibles que contienen pequeñas cantidades de material sólido pueden ser sedimentación gravitacional o centrífuga, coalescencia eléctrica o filtros coalescentes. La coalescencia eléctrica que requiere medios de muy alta resistividad, es particularmente conveniente para grandes cantidades con relativamente poco valor, como en el petróleo crudo en el cual no se requiere generalmente de una gran claridad. Los filtros coalescentes se usan para

mezclas de líquidos casi limpias con tensión interfacial de 10 mN/m ó mayor y que requieren un alto grado de claridad final. Para separaciones de mezclas líquido-líquido-sólido con una cantidad de sólidos apreciable (mayor del 5%), equipos de sedimentación gravitacional o centrifugación pueden llevar a cabo la separación de la tres fases o pueden reducir el contenido de sólidos lo suficiente como para completar la operación con una separación líquido-líquido subsecuente.

En caso de que se requiera separar cantidades considerables de sólidos de líquidos, pueden utilizarse métodos alternativos o complementarios como tamizado, filtración centrífuga, a presión ó a vacío, flotación, así como los métodos más especializados de separaciones electrostáticas o magnéticas.

El tamizado da una separación relativamente incompleta ya que está basado únicamente en el tamaño de partícula, es, sin embargo, particularmente útil para grandes cargas donde los tamaños de partícula exceden 420µm (malla 40) y pueden operar eficientemente hasta 74 µm (malla 200).

Los filtros a presión o a vacío tienen una gran cantidad de aplicaciones, particularmente en la separación de sólidos de lodos con altas concentraciones, en la recuperación de partículas desde finas hasta medianas y fibrosas y en el lavado eficiente, aunque algunas veces el contenido final de líquidos en los sólidos no es bajo.

La filtración centrífuga es frecuentemente aplicada a la

producción intermitente de sólidos finos de secado lento, se obtienen buenos resultados si se aplica a partículas que requieran un buen lavado y bajo contenido de residuo líquido. Mientras que la sedimentación centrífuga se adapta a la recolección y clasificación de partículas sólidas de muy finas a medianas en concentraciones que van desde muy baja a media, así como materiales compresibles, amorfos o gelatinosos que usualmente bloquean el secado.

La sedimentación por gravedad es adecuada para flujos relativamente grandes cuya concentración de sólidos presente velocidades de sedimentación mayores que $1 \cdot 10^{-3}$ cm/s; esta operación se ha visto favorecida por el desarrollo de las tecnologías de floculación y la adición de materiales de ayuda.

La flotación de espuma puede clarificar dispersiones finas de líquidos ó partículas sólidas, particularmente donde la diferencia de densidad entre las fases continua y dispersa es pequeña y el flujo grande; esta práctica es común en la obtención de minerales.

Para la separación de solutos de medio líquido en escala molecular, la ultracentrífuga es útil sólo como una herramienta de laboratorio; en mezclas de gases, la separación por centrifuga de gases puede competir con la difusión térmica y los métodos de difusión a través de membranas selectivas.

Los puntos en común entre los diferentes métodos de separación son muchos y es difícil hacer una elección óptima si no se realizan pruebas en laboratorio o en la misma planta.

CAPITULO II

GENERALIDADES.

II.1 Principios generales.

Cuando un cuerpo de masa m sufre la aplicación de una fuerza F , se acelera en la dirección de la fuerza a una razón constante a que es inversamente proporcional a la masa:

$$a = \frac{F}{m} \quad (1)$$

Cuando se elimina la fuerza, el cuerpo continúa su movimiento en la misma dirección a velocidad constante v . Su aceleración es cero hasta que una fuerza actúe sobre él otra vez. Si el cuerpo es forzado a moverse en un patrón circular, su velocidad escalar sigue siendo v , pero su vector de velocidad cambia continuamente. El cambio en la velocidad vectorial es la aceleración centrífuga,

$$a = \frac{v}{r} * v = \omega^2 r \quad (2)$$

donde r es el radio del patrón circular y ω es la velocidad angular. Si el cuerpo se hace girar atado a una cuerda, el jalón que sufre la cuerda es la fuerza centrífuga F_c , calculada:

$$F_c = m\omega^2 r \quad (3)$$

La fuerza que se manifiesta al otro lado de la cuerda para mantener al cuerpo en su patrón circular en una tangente a este patrón, es la fuerza centripeta F_{cp} .

$$F_{cp} = -m\omega^2 r \quad (4)$$

La fuerza centrífuga difiere de la gravedad en que 1) puede

ser mayor en varios órdenes de magnitud y 2) se aplica en dirección opuesta al eje de rotación, es decir hacia afuera en vez de hacia el eje de rotación.

La magnitud de la fuerza centrífuga es comúnmente definida por la relación $F_c/F_g = \omega^2 r/g = FCR$ (Fuerza centrífuga relativa) ó N_c (número centrífugo) ó g_{es} . Este puede variar desde 200 veces la gravedad para centrifugas de canasta grandes hasta 360 000 para ultracentrifugas y centrifugas tubulares de alta velocidad como las empleadas en sistemas gaseosos. Para separaciones líquido-sólido, la fuerza centrífuga puede ser aplicada en centrifugas sedimentadoras ó en filtros centrifugos y algunas veces en una combinación de ambos. Las centrifugas del tipo sedimentadoras también se usan para la clasificación de partículas sólidas por tamaño y densidad, la separación de líquidos inmiscibles por diferencia de densidades, la separación de macromoléculas tales como virus, la concentración de especies moleculares más pequeñas y la concentración de gases de diferente peso molecular.

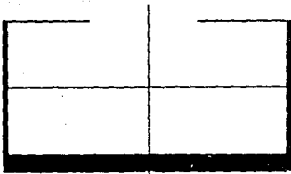
En la figura siguiente se explican los principios de la centrifugación. En la figura 1a un tambor cilíndrico estacionario contiene una cantidad determinada de líquido por ejemplo agua, y algunas partículas sólidas con densidad mayor a la del líquido. Como el tambor está en reposo, la superficie del líquido es horizontal, y con el tiempo los sólidos pesados se sedimentarán y reposarán en el fondo. En la figura 1b, el tambor gira sobre su eje vertical. El líquido y los sólidos se hallan sometidos ahora a

dos fuerzas, la de gravedad que actúa hacia abajo y la centrífuga que actúa horizontalmente. En las centrífugas comerciales el componente de la fuerza centrífuga es tan grande que el componente de la fuerza gravitacional puede ser ignorado. El líquido toma la posición mostrada con una interfase casi vertical. Las partículas del sólido pesado son impulsadas hacia la pared externa y se sedimentan en una masa compacta a lo largo de esta. La orientación del eje de rotación tiene un efecto despreciable en esta acción.

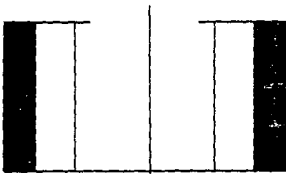
Si al sistema de la figura 1a se le agregan un fluido inmiscible menos denso, por ejemplo aceite y partículas aún más ligeras como corcho granulado, el aceite flotará en el agua y el corcho a su vez flotará en el aceite. Cuando este sistema se hace girar, los varios componentes se estratificarán como se manifiesta en la figura 1c con el más ligero más cerca del eje de rotación y el más pesado adyacente a la pared del tambor.

En la figura 1d la pared del tambor se muestra perforada y cubierta por una membrana permeable, tal como un filtro de paño o una malla de alambre. La malla retendrá las partículas sólidas pero a través de ella el líquido pasará libremente bajo la acción de la fuerza centrífuga.

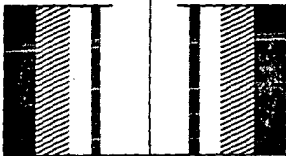
Casi todo el líquido será desaguado a través del medio filtrante dejando una torta relativamente seca.



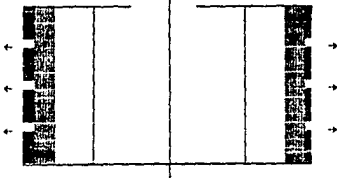
a) Tambor estacionario.
(líquido + sólidos pesados).



b) Tambor en movimiento.
(líquido + sólidos pesados).



c) Tambor en movimiento,
(dos líquidos + dos sólidos).



d) Tambor perforado en
movimiento.
(líquido + sólido).

Figura 1.
Principios generales de la centrifugación.

Una centrífuga normalmente está constituida de las siguientes partes: (1) Un rotor o tambor en el cual se aplica la fuerza centrífuga al sistema cuyos componentes van a ser separados, (2) un elemento para alimentar este sistema al rotor, (3) una flecha, (4) cojinetes, (5) un mecanismo impulsor (motor eléctrico o algunas veces una turbina), (6) un recipiente para contener y segregar los componentes separados, (7) sellos (cuando se necesita mantener vapor ó presión en el sistema) y (8) una estructura que sostenga y alinee todo lo anterior.

II.2 Esfuerzos en Centrífugas.

El análisis completo de los esfuerzos en una centrífuga es muy complicado y va más allá de los objetivos de este trabajo. En esta sección sólo se hará una breve descripción de los parámetros involucrados en forma simplificada.

La rotación de un objeto cilíndrico como el tambor de una centrífuga vacía produce un esfuerzo en la pared del mismo. Si el espesor de la pared es pequeño con respecto al radio desde el eje de rotación,

$$\Gamma_s = \omega^2 r^2 \rho_m \quad (5)$$

donde ρ_m es la densidad del material de construcción de la pared y Γ_s el esfuerzo propio del tambor.

El material que está siendo centrifugado ejerce una presión contra la pared interna del recipiente:

$$p = 0.5 \omega^2 (r_2^2 - r_1^2) \rho_c \quad (6)$$

donde ρ_c es la densidad promedio de los sólidos y el líquido en el tambor. Esta presión del contenido del tambor, produce un esfuerzo adicional en la pared del tambor:

$$\Gamma_c = \frac{0.5 \omega^2 r_2 (r_2^2 - r_1^2) \rho_c}{\delta} \quad (7)$$

donde δ es el espesor de la pared del tambor. El esfuerzo total en la pared del tambor es:

$$\Gamma_t = \Gamma_s + \Gamma_c = \omega^2 r^2 \left[r_2 \rho_m + \frac{(r_2^2 - r_1^2) \rho_c}{4 \delta} \right] \quad (8)$$

Con muy pocas excepciones, las centrifugas comerciales están diseñadas para que Γ_s esté en el intervalo de 45 a 65% de Γ_t . Para un esfuerzo total permisible determinado, basado en un material de construcción determinado y un factor de seguridad aceptable, entre mayor sea la fuerza centrifuga deseada, menor debe ser el diámetro del tambor. Las centrifugas de diámetro pequeño pueden operarse a altas velocidades de rotación y por consiguiente producen una fuerza centrifuga grande; mientras que las centrifugas de diámetros grandes se limitan a velocidades bajas lo que conduce a fuerzas centrifugas menores.

III.3 Materiales de Construcción.

Los rotores de las centrifugas han sido fabricados en casi todas las aleaciones de resistencia razonablemente alta. Se prefiere el uso de metales que tienen al menos el 15% de elongación, para minimizar el riesgo de ruptura en puntos de concentración de esfuerzos. La lista de materiales típicos incluye acero al carbón, acero inoxidable tipos 304, 316 y 317, acero inoxidable 17-4 PH, acero inoxidable Aleación 20 (Carpenter), Monel, Inconel, níquel, Hastelloy, titanio y aluminio reforzado. La cubierta y líneas de alimentación, enjuague y descarga pueden ser fabricados de cualquier material rígido que sea compatible con el ambiente del proceso. Los soportes que son externos al ambiente del proceso son frecuentemente de construcción de hierro colado por rigidez, aunque también se fabrican en acero. Los empaques y anillos 'O' para contener presión, vapor y líquidos pueden obtenerse de elastómeros compatibles para un gran número de procesos.

CAPITULO III

CLASIFICACION DE LAS CENTRIFUGAS

III.1. Clasificación general.

La primera clasificación de las centrifugas se basa en las definiciones de los fenómenos físicos que ocurren en ellas, si incluimos en esta clasificación a las centrifugas de gases, obtenemos los siguientes tipos:

- separación de gases.
- deseemulsificación.
- sedimentación.
- filtración.

Por deseemulsificación se entiende la separación de una mezcla de líquidos en sus componentes que, aunque están mutuamente emulsificados, tienen diferentes densidades. En este grupo están la extracción líquido-líquido y la separación de dos fases. Los procesos de sedimentación tienen lugar durante la decantación, pero también en combinación con la separación (p. ej. separación sólido-líquido-líquido) y filtración (separación sólido-líquido).

La filtración se refiere a los procesos de filtración que tienen lugar en las centrifugas de canasta y filtros centrifugos. En estos también es posible una combinación con sedimentación.

III.2. Clasificación sistemática de las centrifugas.

La figura 2 muestra la asociación de estas definiciones,

donde las letras:

L = líquido

S = Sólido

G = Gas.

indican el tipo de separación centrífuga.

Clasificación sistemática de las centrifugas.

I.- Separación de gases.

- 1) Separación de isótopos. (G/G) centrifuga de gases.
- 2) Degasado. (L/G) centrifuga de capa fina.

II.- Deseemulsificación.

- 1) Extracción. (L/L) Extractores de cámara anular, espiral y de tambor de discos.
- 2) Separación
 - a) de dos fases. (L/L) Separadores tubulares y de discos.
 - b) de tres fases. (S/L/L) Separador tubular, de discos, de toberas y autodeslodante.

III.- Sedimentación.

- 1) Separación de tres fases. (S/L/L) Separador tubular, de discos, de toberas y autodeslodante.
- 2) Decantación.* (S/L) Decantador, centrifuga con rebosadero, de doble cono, tubular,

de cámara anular, de
tubos, de discos, de
toberas y ciclones.

3) Sedimentación y filtra-
ción combinada.

(S/L)

Decantador con malla,
de cono diferencial.

IV.- Filtración.

1) Centrifuga de Canasta. (S/L)

2) Filtro Centrifuga. (S/L)

* En lo sucesivo, cuando se refiera a un decantador debe entenderse que se trata de un decantador centrifugo.

Fig. 2.

Podemos considerar básicamente dos tipos diferentes de centrifugas para llevar a cabo estas operaciones. En el primero, el cual puede describirse como una *máquina sedimentadora*, el líquido o alguna de las fases líquidas es continua y las partículas dispersas de la fase sólida o de la otra fase líquida son forzadas a moverse a través de la fase continua debido a la aceleración de la fuerza centrífuga. La relación matemática que gobierna la velocidad de migración de las partículas fue desarrollada por Stokes como la ley que lleva su nombre.

El segundo tipo básico de centrifuga puede ser descrito como un *Filtro centrifugo*. En él, la fase sólida está soportada en una superficie permeable, tal como una malla, a través de la cual la fase continua tiene el paso libre bajo la aceleración de la fuerza centrífuga. Las relaciones matemáticas para este tipo de

centrífuga no han sido estudiadas tan exhaustivamente como las del tipo en el cual la fase líquida es continua. La evaluación del funcionamiento de la centrífuga del tipo *filtro centrífugo* es casi enteramente empírica.

III.3. Centrífugas sedimentadoras.

Una centrífuga sedimentadora es un tambor no perforado en el cual se alimenta una suspensión y se hace girar a alta velocidad. El líquido es separado continua o intermitentemente, mientras que los sólidos permanecen en el tambor.

Las unidades industriales se distinguen de acuerdo al diseño del tambor y al mecanismo de descarga de los sólidos. La figura 3 muestra los diferentes tipos de centrífugas sedimentadoras.

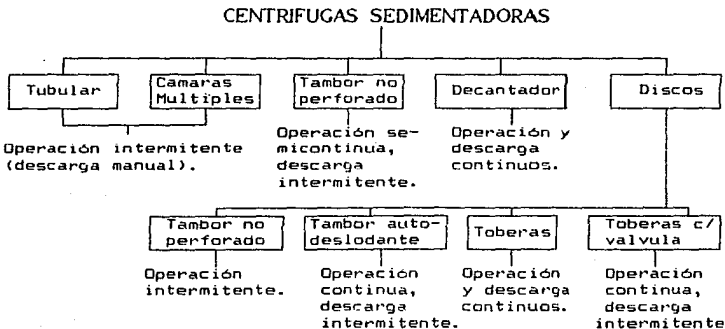


FIGURA 3

Centrifugas sedimentadoras.

III.3.A. Centrifuga tubular.

En este tipo de centrifuga la alimentación penetra por la parte inferior con flujo lineal, un deflector rompe este patrón y lleva al líquido a la velocidad angular del tambor mediante el uso de platos radiales. El líquido que llena el espacio disponible está estacionario con respecto al tambor y sólo una delgada capa cilíndrica fluye hacia arriba desde el fondo y es descargada por el rebosadero. El espesor de la capa es de 1-2 mm, dependiendo del tamaño del tambor y del flujo. El diámetro externo máximo de esta capa es equivalente al diámetro del rebosadero. El líquido que se encuentra más allá de este diámetro no está envuelto en el proceso de separación.

Entre mayor sea el flujo hacia el tambor, más gruesa será la capa de líquido, más grande será la distancia de separación efectiva, menor será el tiempo que el líquido permanece en el tambor y menos eficiente será la separación.

Las ventajas que tiene este diseño son:

- eficiencia de clarificación substancialmente constante hasta que los sedimentos depositados han alcanzado el diámetro del rebosadero,
- fácil desarmado del tambor,
- fácil limpieza.

Las desventajas son:

- una pequeña área de clarificación equivalente,
- debido al flujo axial casi cilíndrico, únicamente puede utilizarse para la clarificación y separación el diámetro del

reosadero por lo cual la aceleración centrífuga efectiva es considerablemente reducida a pesar de la alta velocidad de rotación,

- poca capacidad para manejar sólidos.

Para una operación económica deben usarse únicamente mezclas líquidas con baja concentración de sólidos ya que la capacidad para albergar sólidos es mínima y se tiene que descargar manualmente.

Actualmente se utilizan para la purificación de aceite combustible, lubricantes usados y otros aceites industriales mediante la separación de sólidos suspendidos y dejándolos libres de humedad; para la remoción de partículas indeseables de tintas, lacas pigmentadas y esmaltes; para el 'pulido' de aceites de cítricos y otros aromáticos; para la clarificación de productos muy viscosos como chicle y acetato de celulosa; para recuperar bacterias; y para la recuperación a altas concentraciones de fracciones de proteínas precipitadas selectivamente a partir de plasma sanguíneo. (FIG. 4).

III.3.B. Centrifuga de cámaras.

Si se conectan varias cámaras concéntricas en serie se logra un aumento en el área de clarificación equivalente. El líquido fluye a través de estas cámaras desde la más interna hacia la más externa. Se logra una distancia de sedimentación relativamente pequeña, a la vez que el tiempo de residencia de la alimentación en el tambor es grande.

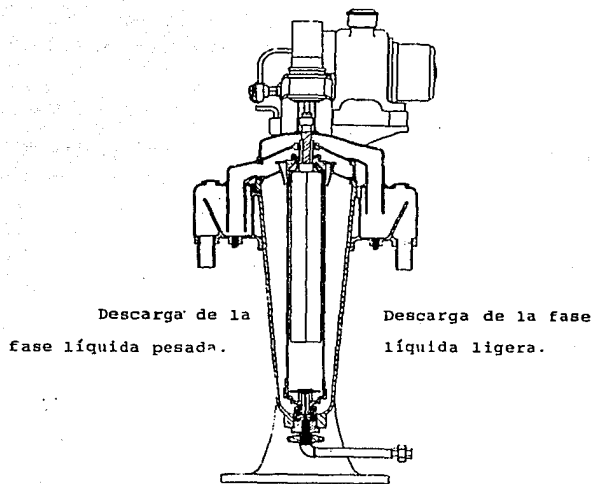


Fig. 4. CENTRIFUGA TUBULAR.

Cada cámara actúa individualmente bajo el mismo principio que la centrífuga tubular. La clarificación toma lugar únicamente en la delgada capa cilíndrica que fluye axialmente. El espesor de las capas en las cámaras decrece conforme se alejan del centro. Es mayor en la cámara central que en la más externa. De esta forma, la distancia de sedimentación efectiva también disminuye de la cámara central hacia las externas. Como la fuerza centrífuga aumenta de cámara a cámara, las partículas más pesadas se separarán en las cámaras internas mientras que las más finas lo harán en las externas para una viscosidad y diferencia de densidad determinadas en la alimentación. Por esta razón un tambor de cámaras tiene un efecto de clasificación de los sólidos separados.

Este tambor tiene las siguientes ventajas:

- la eficiencia de clarificación es buena hasta que los sólidos llenan los espacios correspondientes,
- gran capacidad para almacenar sólidos.

Las desventajas son:

- sólo se puede utilizar para procesos intermitentes como clarificador para separar los sólidos de una suspensión.
- No puede ser utilizado para separar una mezcla de líquidos en sus diferentes fases,
- Cuando las cámaras se han llenado con sólidos, la centrífuga debe ser detenida y limpiada manualmente, cada cámara debe limpiarse individualmente. Una centrífuga de cámaras tiene normalmente de 2 a 6 cámaras.

Las centrífugas de cámaras se utilizan para pulir líquidos en

las industrias de bebidas, química y farmacéutica, particularmente cuando además de clarificar el líquido, se requiere recuperar simultáneamente a los sólidos. También se utiliza cuando debido al carácter erosivo de los sólidos no se puede emplear una centrifuga continua. (FIG. 5).

III.3.C. Centrifuga de tambor no perforado.

La centrifuga de tambor no perforado o de canasta es una adaptación de la centrifuga de canasta normal utilizada para filtración. Es muy similar a la centrifuga tubular pero su relación altura diámetro es mucho menor.

La alimentación se introduce por la parte inferior, los sólidos se separan en la pared del tambor y el líquido se desborda continuamente por la parte superior. Al término de un ciclo de operación, usualmente determinado por el espesor de la torta, el líquido sobrenadante puede ser extraído para obtener una torta seca al final de la operación.

El método de descarga depende del tipo de sólidos, por ejemplo los sólidos plásticos y suaves se tratan a velocidad total mientras que los sólidos fibrosos son separados por un cuchillo a velocidad menor. La torta se recoge en el fondo del tambor.

Las aplicaciones típicas de este tambor están en la recuperación de sólidos de corrientes residuales.

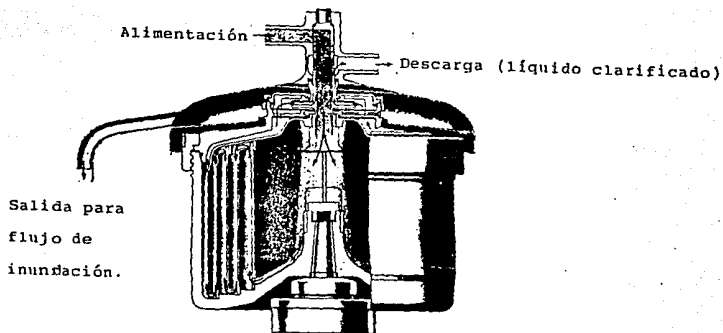


Fig. 5. CENTRIFUGA CON TAMBOR DE CAMARAS.

III.3.D. Decantador centrifugo.

La separación o clarificación se lleva a cabo en un tambor rotatorio horizontal. Normalmente los tambores consisten en una sección cilíndrica y una sección cónica. El producto entra al decantador a través del tubo de alimentación y es introducido al tambor a través de una distribución de cámaras preseleccionada. Al girar el tambor, los sólidos se sedimentan rápidamente contra las paredes del mismo. Un transportador helicoidal girando a una velocidad ligeramente mayor a la del tambor, mueve los sólidos a través de la sección cónica hacia la descarga. Al mismo tiempo la fase líquida fluye a través de la sección cilíndrica hacia la descarga del líquido. (ver figura 6).

Funcionalmente el tambor consiste en una zona de 'costa' y una de 'lago'. La zona de costa está en la sección cónica donde el desaguado de los sólidos tiene lugar. Los sólidos se separan del líquido en la zona de lago la cual incluye la sección cilíndrica y parte de la sección cónica (ver diagrama). Entre mayor sea la zona de lago, mejor será la clarificación. Entre mayor sea la zona de costa más secos se recuperarán los sólidos.

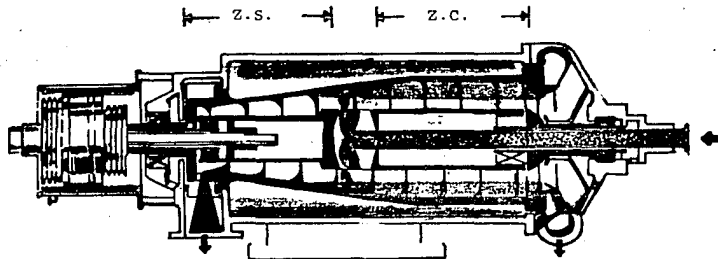
Las longitudes relativas de las zonas de costa y playa son ajustables. Esto se logra cambiando el diámetro del rebosadero de descarga de líquido, el cual se fija mediante un anillo regulador.

Los anillos se encuentran disponibles con varios diámetros internos; un diámetro interno grande tiene el efecto de agrandar la zona de costa y acortar la de lago; un diámetro pequeño tiene

Fig. 6. DECANTADOR CENTRIFUGO.

Z.S. = Zona de secado.

Z.C. = zona de clarificación.



Descarga de
sólidos.

Descarga de líquido
clarificado.

el efecto contrario.

Los decantadores se encuentran disponibles con ángulos pronunciados y ángulos suaves esto se debe al tipo de sólidos a manejar, el tipo de ángulo suave se recomienda para sólidos amorfos, tixotrópicos, pegajosos, viscosos. Los de ángulo pronunciado se recomiendan para sólidos granulares o cristalinos. además, el ángulo pronunciado aumenta la zona de lago, lo que resulta en una mayor capacidad de clarificación.

Las aplicaciones típicas del decantador son:

En la industria química, en el manejo de ácidos, sales, pigmentos en general, resinas, zeolitas, lodos con catalizadores, etc; en la industria farmacéutica, caldos de fermentación, insulina, vitaminas, etc; en la industria del almidón; en la industria alimenticia, aceites vegetales en general así como jugos de frutas y vegetales, extractos de café y té, etc; en la industria del vino y la cerveza y en el tratamiento de aguas residuales entre otras.

A continuación se muestra una tabla con las características principales de los tipos de centrifugas descritos anteriormente.

TIPO DE CENTRIFUGA.

	TUBULAR	CAMARAS	CANASTA	DECANTADOR
λ^{ϵ}	4 - 7	1	0.6	1.5 - 3.5
velocidad (rpm)	13 000 a 50 000	5 000-10 000	450 - 3 500	1 600 - 6 000 $\Delta v = 5 - 100$ *
FCR ξ (ges)	13 000 a 83 000	6 000-11 400	300 - 1500	770 - 5 500
diametro del tambor (mm)	4.44 - 150	125 - 615	100 - 2400	152 - 1370
Flujo (m ³ /h)	0.4 - 4.0	3.5 - 10	6.0 - 10	0.4 - 170
capacidad p/ retener sólidos	2 - 10 l	0.25 - 65 l	20 - 500 l	- 60 ton/h **
% en vol. de sólidos permisible	< 1	< 4 - 5	3 - 60	2 - 60
partículas separadas (μm)	- 0.1	- 2	≥ 8	≥ 2

* Δv es la diferencia de velocidad entre el tambor y el transportador helicoidal que recoge los sólidos.

** La descarga de sólidos es continua.

λ es la relación altura/diámetro

FIGURA 7

III.3.E. Centrifugas de discos.

Las centrifugas de tambor de discos se utilizan para separar sólidos de líquidos así como líquidos inmiscibles. Se emplearon por primera vez hace más de 100 años para separar la crema de la leche y ahora se utilizan en una gran variedad de procesos, desde la recuperación de aceite de aguas residuales hasta la separación de células de caldos de fermentación.

En la figura 8 se muestra una centrifuga de discos, la característica principal es que el radio del tambor está dividido por una serie de discos, normalmente de 20 a 200. Esto aumenta el área de sedimentación disponible en un volumen determinado y reduce la distancia radial que debe viajar una partícula antes de sedimentarse sobre una superficie. El espaciamiento típico entre discos es de 0.5 - 1.0 mm; los discos se mantienen separados mediante espaciadores metálicos.

Para analizar el funcionamiento de una centrifuga de discos vamos a tomar como ejemplo una separación líquido-líquido-sólido. El material alimentado se introduce en el eje de rotación, se mueve hacia afuera a través de una cámara de distribución y entonces penetra en la hacin de discos. Como el líquido ligero asciende entre los discos, los sólidos y el líquido más pesado se mueven hacia afuera. Cuando los sólidos alcanzan un disco, se mueven a lo largo de la superficie y se sedimentan en la periferia del tambor. El ángulo (θ) entre los discos y el eje de rotación es normalmente de $35-45^{\circ}$; tiene que ser lo suficientemente grande para que los sólidos se muevan a lo largo de la superficie sin

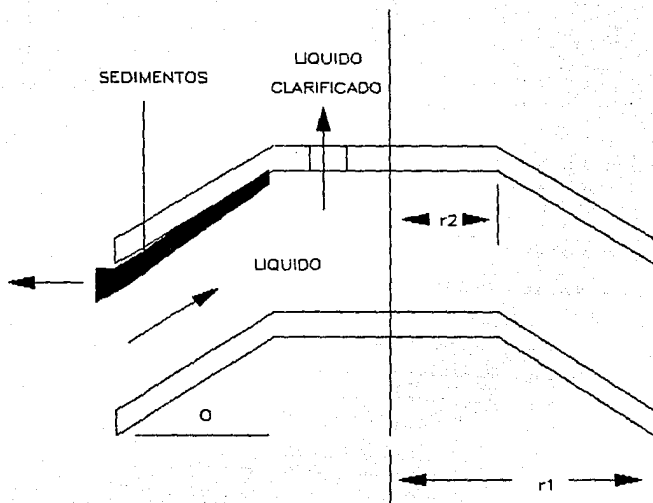


FIG. 8. PRINCIPIOS DE UNA CENTRIFUGA DE DISCOS.

depositarse en el disco, pero no tan grande como para perder la ventaja de una distancia de sedimentación pequeña.

Hay cuatro tipos básicos de centrifugas de discos. La principal diferencia entre ellas es el método mediante el cual descargan los sólidos. Esto conduce a su vez a diferencias en la cantidad de sólidos que pueden manejar. La más sencilla es la de tambor no perforado, que se utiliza principalmente para separaciones líquido-líquido. Otras son el tipo de toberas, para recuperar grandes cantidades de sólidos blandos y los tipos de toberas con válvulas y autodeslodante, las cuales descargan intermitentemente y pueden ser limpiadas en su sitio.

I.- Centrifuga de discos de tambor no perforado.

La centrifuga de tambor no perforado es la más simple y barata de todas las centrifugas de discos. En ella los sólidos sedimentados se recogen en la pared interna del tambor. Para extraerlos es necesario detener y desarmar la máquina, lo que ocasiona una labor pesada y que consume mucho tiempo. (Figura 8a).

El uso más común de estas centrifugas es separar dos líquidos inmiscibles que contengan poco o ningún material sólido. Sus aplicaciones más comunes son la purificación de aceites combustibles ligeros y pesados, aceites lubricantes y aislantes y en la separación de plastas de jabón durante el refinamiento de grasas y aceites vegetales y animales. También se utilizan para separar la crema de la leche aunque actualmente la mayoría de estas separaciones se realizan en centrifugas autodeslodantes.

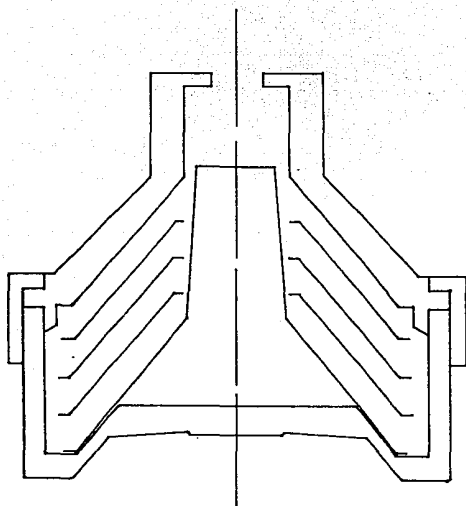


Fig. 8a. TAMBOR DE DISCOS DE PARED NO PERFORADA

II. Centrífuga de tambor de discos con toberas.

Las centrífugas de toberas descargan sólidos continuamente, en forma de lodo, a través de toberas localizadas en el diámetro mayor del tambor. Estas centrífugas pueden manejar la mayor cantidad de sólidos en la alimentación. (Figura 9).

Las toberas están diseñadas para minimizar el taponamiento y la erosión y de hecho pueden manejar sólidos que son demasiado pegajosos o compactos para ser descargados por una autodeslodante. La apertura de las toberas varía de 0.5 hasta 3 mm en las máquinas más grandes; hay de 2 - 24 toberas dependiendo del tamaño de la centrífuga. Para evitar el taponamiento, la alimentación es usualmente tamizada para separar los sólidos mayores al 50 - 60% del diámetro de la tobera. Para protegerla de la erosión, las toberas están endurecidas con materiales como carburo de tungsteno, carburo de boro, zafiro o materiales cerámicos.

Algunas centrífugas de toberas están diseñadas para concentrar el lodo reciclándolo, mediante pasajes especiales que lo llevan cerca de las toberas.

Debido a que descargan grandes cantidades de sólidos continuamente, las centrífugas de toberas necesitan el doble de potencia que requiere otra centrífuga de discos.

Las centrífugas de toberas se usan para recuperar sólidos como arcilla, almidón, levadura, gluten de maíz, proteínas vegetales y unicelulares y lodos residuales activados. También se

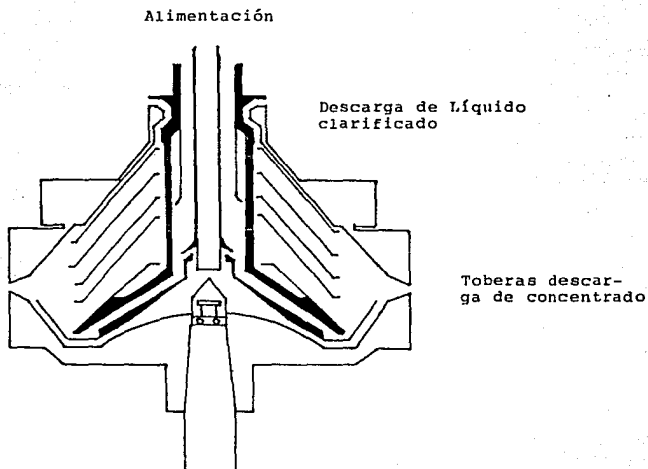


Fig. 9. Centrífuga de Tambor de discos con toberas.

utilizan para separaciones líquido-líquido-sólido como en la recuperación de aceites de cítricos y de pescado.

III. Centrifugas autodeslodantes.

Las centrifugas autodeslodantes han reemplazado a las de tambor no perforado en muchas aplicaciones. Aunque cuestan aproximadamente el doble y necesitan mayor potencia, reducen el tiempo muerto y ahorran trabajo: No tienen que ser detenidas para descargar los sólidos y pueden ser diseñadas para limpiarse 'in situ'. (Figura 10).

El tambor de una centrifuga autodeslodante está dividido en dos partes, con un empaque de elastómero entre ellas. La parte superior está fija pero la parte inferior puede abatirse dejando un espacio a todo lo largo de la circunferencia. Los sólidos se descargan al abrirse el tambor girando a su velocidad de operación. Normalmente, la parte inferior del tambor es mantenida en su sitio por presión hidráulica y se abate cuando la presión es retirada.

Algunos modelos descargan en un período de 0.13-0.30 s. El período entre descargas puede variar desde unos segundos hasta horas; pero la mayoría de los fabricantes recomiendan no descargar más de una vez por minuto.

Estas centrifugas son ampliamente usadas en las industrias alimenticia y farmacéutica: Pueden ser diseñadas para limpiarse 'in situ', sin detenerse; y pueden estar selladas herméticamente.

- 1 Alimentación
- 2 Descarga de la fase líquida ligera
- 3 Descarga de la fase líquida pesada
- 4 Rodete para líquido pesado
- 5 Rodete para líquido ligero
- 6 Platos
- 7 Distribuidor
- 8 Canales ascendentes
- 9 Plato separador
- 10 Cámara de concentrado
- 11 Expulsión de concentrado
- 12 Pistón deslizante
- 13 Válvula de pistón
- 14 Salida del lodo
- 15 Cámara de agua de cierre
- 16 Conducto de agua de apertura

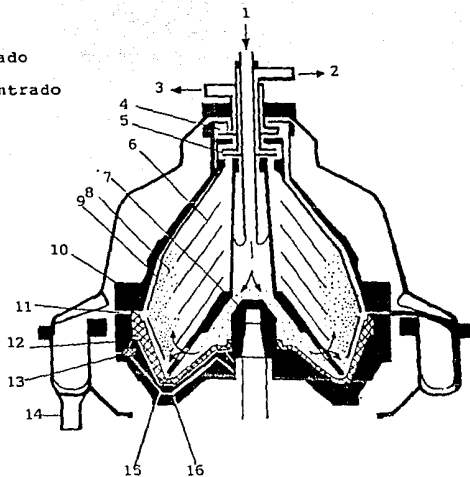


FIG. 10. Centrífuga de discos de Tambor autodesludante

Los usos específicos incluyen la clarificación de jugo de frutas y vegetales, cerveza, vino, extractos de café y grasas animales.

IV.- Centrifuga de tambor de toberas con válvulas.

Las primeras centrifugas de toberas con válvulas fueron básicamente centrifugas de toberas adaptadas con válvulas para que descargaran intermitentemente en vez de continuamente. Este diseño mostró ser complicado por lo que la mayoría de estas máquinas han sido reemplazadas.

En los nuevos modelos, las 'válvulas' son discos de elastómero pegados a un anillo deslizante que sella el fondo del tambor. Cuando el anillo es forzado a bajar por la presión de un fluido hidráulico, todas las válvulas se abren a la vez y el lodo es descargado. Estas centrifugas tienen la descarga más rápida de todas -típicamente, 0.07-0.10 seg-. (Figura 11).

Con su gran capacidad y fuerza centrífuga, la centrifuga de toberas con válvulas puede competir con los filtros para aplicaciones tales como el pulido de líquidos y la recolección de partículas finas. Es compacta; no hay filtro ayuda que contamine los sólidos separados; y puede estar herméticamente sellada si se requiere.

La limitación principal de una centrifuga de toberas con válvulas es que solo puede manejar cierto tipo de sólidos, aquellos que tengan un alto grado de plasticidad y fluyan bajo las grandes fuerzas ejercidas en la periferia del tambor. En una

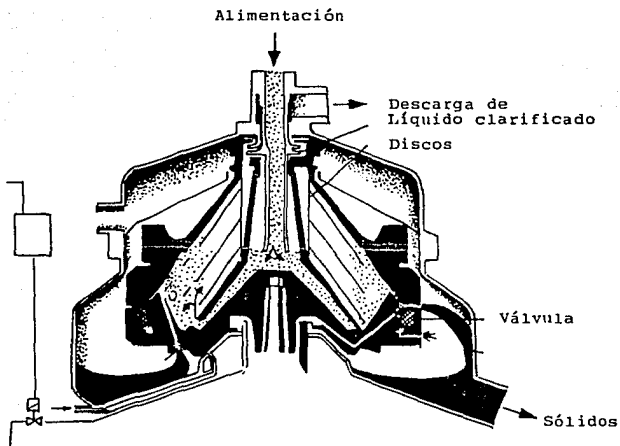


Fig. 11. Centrífuga de tambor con toberas y válvulas

aplicación típica, los sólidos descargados tienen una consistencia como de pasta de dientes. Los sólidos manejados incluyen microorganismos, como bacterias o sus células fragmentadas, sólidos coloidales en un lodo pesado, como catalizadores finos en ácidos grasos o alcoholes.

Las centrifugas de toberas fueron usadas primero en la industria vinícola, para la clarificación y remoción de sólidos. También se usan en la industria cervecera para clarificar cerveza, en la industria azucarera para espesar jugos y en la industria farmacéutica para caldos de fermentación. En las industrias química y del petróleo, sus aplicaciones incluyen el pulido de aceites lubricantes y aditivos y la recuperación de catalizadores finos de licores de proceso.

A continuación se presenta una tabla comparativa con las características más sobresalientes de los diferentes tipos de centrifugas de discos.

En la tabla aparece por vez primera el concepto Σ que es el Área equivalente de una centrifuga comparada con un sedimentador por gravedad. Este concepto se definirá a continuación en la sección 'Teoría de la sedimentación centrífuga'.

CENTRIFUGAS DE DISCOS

	Tambor no perforado	Toberas	Autodeshidrante	Toberas c/ valvulas
FCR (ges)	4 000 - 8 000	4 000 - 8 000	4 000 - 7 000	14 000 a 15 000
Flujo máx. (m ³ /h)	0.02 - 90	2.27 - 227	0.23 - 90	0.23 - 34
Sólidos en alim. % volumen	< 2.0	8 - 24	2 - 20	< 10.0
Diámetro tambor (mm)	150 - 610	150 - 910	200 - 810	610
Σ [*] (m ²)	3 000 - 150 000	5 000 - 240 000	4 000 - 140 000	100 000 - 130 000
Diám. de part. sep (μ m)	0.5 - 700	0.5 - 700	0.5 - 700	0.5 - 700
Costo	el más bajo	bajo	alto	alto
Construc- ción.	simple	simple	compleja	compleja
Descarga de sólidos	fuera de línea	continua	periódica	periódica
Aparien- cia de la descarga	torta firme	lodo	pasta espesa	pasta espesa
Tipo de sólidos manejado	cualquiera	debe ser plástico	plástico	plástico
Limpiable en su sitio	no	sí	sí	sí
Sellado hermético	no	sí	sí	sí

CAPITULO IV.

PRINCIPIOS DE OPERACION Y DISEÑO DE LOS SEPARADORES CENTRIFUGOS.

IV.1. Fuerzas acelerantes.

El principio básico de la sedimentación, decantación y centrifugación es la utilización de campos y fuerzas acelerantes. Una partícula puede separarse en un campo acelerante únicamente si su densidad es diferente a la del líquido que la transporta. Sólo así, el campo acelerante los afecta a ambos y los hace separarse. Dos componentes con la misma densidad no pueden ser separados en un campo de este tipo. Esto se aplica tanto a la sedimentación como a la centrifugación.

La fuerza del campo acelerante tiene una influencia decisiva en el tiempo de sedimentación, especialmente si la diferencia de densidad entre los componentes de la mezcla que se va a separar es pequeña. La relación de la aceleración centrífuga a la gravitacional está definida por el factor centrífugo (g_c), también se le conoce como número centrífugo (N_c), fuerza centrífuga relativa (FCR) ó factor de aceleración (ζ).

$$\zeta = \frac{r \omega^2}{g} \quad (9)$$

donde:

r = radio.

ω = velocidad angular.

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

FACTORES DE ACELERACION TÍPICOS EN CENTRIFUGAS.

FIG. 13.

Ultracentrifugas	$\xi = 10^5 - 10^6$
Centrifugas tubulares	$\xi = 13\ 000 - 17\ 000$
Centrifugas de discos	$\xi = 5\ 000 - 13\ 000$
Decantadores	$\xi = 1\ 500 - 4\ 500$
Centrifugas de canasta y filtros centrifugos	$\xi = 300 - 1\ 500$

IV.2. Teoría de la centrifuga sedimentadora.

Para que una centrifuga de tipo sedimentadora haga trabajo útil, su campo de fuerza debe hacer que las partículas de la fase dispersa se muevan con una velocidad, v_s , en una dirección diferente a la paralela de la fase continua. La fuerza efectiva que actúa sobre una partícula en un campo centrífugo es:

$$F = (m - m_1) \omega^2 r^2 \quad (10)$$

donde m es la masa de la partícula dispersa y m_1 la masa del volumen equivalente de la fase continua que es desplazado por la partícula. Si suponemos que la esfera es una esfera de diámetro D , entonces la ecuación toma la forma:

$$F = \pi \Delta\rho D^3 \omega^2 r \quad (11)$$

en la cual $\Delta\rho = \rho - \rho_1$, la diferencia en densidad entre la fase continua, ρ_1 , y la dispersa, ρ . Dado que la fuerza de separación es directamente proporcional a esta diferencia de densidades, es

obvio que para que haya separación, debe haber diferencia de densidad entre las fases presentes.

El movimiento de la fase dispersa es impedido por la resistencia de la fase continua al movimiento a través de ella. Para partículas pequeñas moviéndose a velocidades moderadas (debajo del intervalo turbulento) esta fuerza de oposición es proporcional a la velocidad de la partícula, y para el caso particular de una partícula esférica está definida por la ley de Stokes como:

$$v_s = \frac{\Delta \rho D^2 \omega^2 r}{18 \mu} \quad (12)$$

Como la capacidad de una centrífuga está limitada normalmente por la facilidad que tiene para manejar las partículas más pequeñas en un sistema dado, esta fórmula tiene una gran importancia en el análisis de su funcionamiento.

Cuando la partícula no es esférica, debe introducirse un valor para el diámetro de la esfera equivalente. Para partículas pequeñas, cuando el tamaño puede ser calculado de datos de difusión ó velocidades de sedimentación, es posible llegar a un factor de forma para la partícula, como se menciona en el trabajo de T. Svedberg (15).

$$v_g = \frac{\Delta \rho D^2 g}{18 \mu} \quad (13)$$

donde g es la constante gravitacional. Es notable que esta ecuación difiere de la de la velocidad de sedimentación en un

campo centrífugo únicamente por la sustitución de g por $\omega^2 r$.

El campo centrífugo difiere del gravitacional únicamente en que puede ser mayor en varios órdenes de magnitud y en que varía en proporción a la distancia desde el centro de rotación, r , de tal forma que la velocidad de sedimentación de una partícula aumenta conforme se aleja del centro de rotación, mientras que en el gravitacional su velocidad es independiente de la posición.

Si consideramos la forma de centrífuga más sencilla, un tambor con tapas, girando y con turbulencia despreciable, (Fig 1), v_s es la velocidad con la cual la partícula se aproxima a la pared del tambor. Si se considera al líquido en el tambor como una capa de espesor s , ser alimentado y descargado continuamente, entonces el tiempo t durante el cual el líquido está en el tambor es V/Q , donde V es el volumen de líquido en el tambor a un tiempo determinado y Q es el flujo de líquido a través del tambor. Como hemos supuesto que s es pequeño, la velocidad de sedimentación de una partícula será aproximadamente uniforme y la distancia sedimentada por la partícula será:

$$x = v_s t = \frac{\Delta\rho D^2 \omega^2 r}{18 \mu} \frac{V}{Q} \quad (14)$$

Si x es mayor que la distancia inicial de la partícula desde la pared del tambor, será separada de la fase líquida; de otra forma permanecerá en suspensión y será descargada con el licor efluente. En un sistema ideal, cuando $x = s/2$, la mitad de las partículas de diámetro D serán separadas de la suspensión y la otra mitad no. Esta condición se conoce como el *punto de corte* y

el flujo, Q, en el corte será:

$$Q = \frac{\Delta\rho D^2}{9\mu} \frac{V\omega^2 r}{s} \quad (15)$$

a partir de esta ecuación, se puede calcular el diámetro crítico:

$$D = \sqrt{9\mu Q \frac{s}{V\omega^2 r}} \quad (16)$$

Las partículas mayores que este diámetro serán separadas en su mayoría y la más pequeñas permanecerán en suspensión.

Para centrifugas más complicadas que un simple tubo con una capa muy delgada de líquido, el radio, r, y el espesor de la torta, s, deben ser corregidos y reemplazados por los valores correspondientes de r_o y s_o.

Si en una centrifuga tubular la capa de líquido no es delgada, pero se extiende de r₁ a r₂, entonces puede demostrarse que:

$$\frac{r_o}{s_o} = \frac{1}{\ln \left[\frac{2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right]} \approx \frac{\frac{1}{2} r_2^2 + \frac{1}{2} r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (17)$$

La ecuación (15) puede escribirse como:

$$Q = 2 v_g \Sigma \quad (18)$$

donde:

$$v_g = \frac{\Delta\rho D^2 g}{18\mu} \quad (19)$$

y

$$\Sigma = \frac{V\omega^2 r_o}{g s_o} \quad (20)$$

Se observa que los elementos que se refieren al sistema liquido están todos incluidos en el primer grupo, mientras que el segundo grupo incluye a los elementos concernientes a la centrifuga. Σ es un indicador del tamaño de la centrifuga, de hecho tiene la dimensión (longitud)² y es el área equivalente de un tanque sedimentador teóricamente capaz de hacer el mismo trabajo de separación efectivo.

Charles M. Ambler (2,3) desarrolló para los diferentes tipos de tambores las ecuaciones correspondientes:

A. Para la centrifuga de tubos o de laboratorio:

$$\Sigma = \frac{\omega^2 v}{4.6 \log \left[\frac{2 r_2^2}{r_1^2 + r_2^2} \right]} \quad (21)$$

B. Para la centrifuga de tambor tubular:

$$\Sigma = \frac{\pi l \omega^2}{g} \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{\ln \left[\frac{2 r_2^2}{r_2^2 + r_1^2} \right]} \quad (22)$$

para la cual se tiene una aproximación:

$$\Sigma = \frac{2 \pi l \omega^2}{g} \left(\frac{3}{4} r_2^2 + \frac{1}{4} r_1^2 \right) \quad (22a)$$

C. Para la centrifuga del tipo de discos:

$$\Sigma = \frac{2 \pi n \omega^2 (r_2^3 - r_1^3)}{3 g C \tan \theta} \quad (23)$$

donde C es un factor de eficiencia que puede ser igual a 1 sólo en el caso en que se comparen centrifugas de geometría similar, de otra forma puede variar entre 0 y 2 de acuerdo al tipo de centrifuga con que se compare.

En todas estas ecuaciones, los cálculos se basan en el comportamiento de una partícula bajo condiciones de sedimentación no impedida y la suposición de que esta partícula está siempre en equilibrio con el campo de fuerza de la centrifuga bajo las condiciones definidas por la ley de Stokes.

En la realidad, los resultados predichos por la ley de Stokes son difícilmente obtenidos, principalmente debido a que:

- En la mayoría de los sistemas industriales, el movimiento de cualquier partícula es estorbado por las partículas más pequeñas delante de ésta, ocurriendo así, una sedimentación impedida.

- Una partícula moviéndose en la centrifuga está pasando constantemente a través de campos de fuerzas mayores (si es más pesada que la fase continua) por lo cual está siendo acelerada y su velocidad es algo menor que la calculada para las condiciones de equilibrio.

- Las leyes de conservación de momento predicen que la velocidad rotacional de la partícula si es relativamente pesada será menor que la velocidad rotacional de la centrifuga y del fluido en ella.

- En algunos sistemas, al menos una parte de la energía dada a la corriente de alimentación en llevarla hasta la velocidad rotacional de la centrifuga creará subdivisiones ulteriores de las partículas de la fase dispersa reduciendo el valor efectivo de D , particularmente si aquéllas son de baja estabilidad mecánica como el aceite en agua.

Sin embargo, el concepto sigma es de gran valor en la comparación y estimación del funcionamiento de centrifugas de geometría similar.

IV.3. Comparación de centrifugas.

En la ecuación (18) $Q/\Sigma = 2 v_g$ es constante para un sistema determinado, de esta forma, debería ser posible, en los límites previamente establecidos, comparar varias centrifugas entre sí con sedimentadores gravitacionales en la base de que:

$$\frac{Q_1}{\Sigma_1} = \frac{Q_2}{\Sigma_2} = \frac{Q_3}{\Sigma_3} \dots = 2 v_g \quad (24)$$

Para centrifugas de geometría similar, esta relación ha sido comprobada para bajas concentraciones de una dispersión de partículas de arcilla, que han sido previamente clasificadas entre los límites del intervalo de distribución de tamaño de partículas.

En este sistema ideal, cuando un valor de C en la ecuación (23) de 1.8 es usado para calcular sigma de la centrifuga de discos, la relación aparece como válida entre las centrifugas tubular y de discos con una diferencia en el intervalo del error

experimental.

Este tratamiento de la teoría concierne a la sedimentación de una partícula en un campo de fuerza en el cual no es afectada por la presencia de otras partículas. Para partículas pequeñas de diámetro menor que el patrón libre medio de las moléculas de la fase continua, la constante de difusión

$$D' = \frac{RT}{3 \pi \mu ND} \quad (25)$$

puede ser significativa y la fuerza centrífuga debe ser lo suficientemente grande para imponerse a las fuerzas de difusión y se pueda aplicar la ley de la sedimentación.

IV.4. Separación liquido-liquido.

Las centrifugas comerciales son utilizadas también para separar continuamente líquidos inmiscibles como aceite y agua. En estos sistemas, una fase está dispersa en la otra y se considera una separación efectiva cuando se han extraído las partículas requeridas de la fase dispersada. Para operar tal sistema estable y continuamente es necesario mantener a los líquidos separados en una condición de balance hidrostático.

La fórmula general que se tiene (ver figura) es:

$$\int_{r=a}^{r=l} \rho_l f(r) dr = \int_{r=a}^{r=h} \rho_h f(r) dr \quad (26)$$

En el campo gravitacional de la tierra los valores de $f(r)$ son casi idénticos y se eliminan, de tal forma que:

$$\rho_l (e - l) = \rho_h (e - h) \quad (27)$$

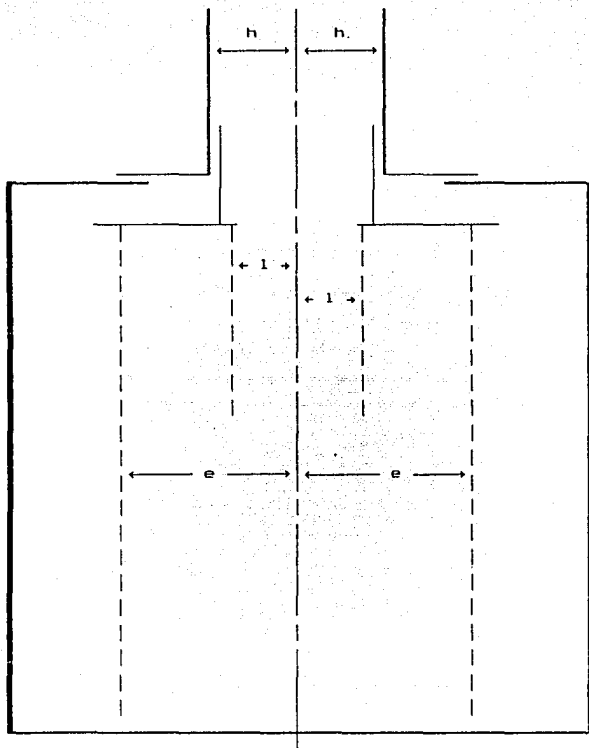


FIG. 14. Modelo de separación líquido-líquido.

En la centrifuga no se da este caso y:

$$\frac{\omega^2 \rho l (e^2 - l^2)}{2} = \frac{\omega^2 \rho h (e^2 - h^2)}{2} \quad (28)$$

$$E = \frac{\rho l}{\rho h} = \frac{e^2 - l^2}{e^2 - h^2} \quad (29)$$

La fórmula general es igualmente aplicable al campo gravitacional de la tierra si las distancias l , e y h son medidas desde el centro de ésta, tal como son medidas desde el eje de rotación de la centrifuga.

Generalmente, la regulación se lleva a cabo mediante el uso de anillos presa o con diferentes tamaños de orificios de descarga de la fase pesada.

CAPITULO V.

FILTRO CENTRIFUGO.

V.1. Generalidades.

La centrifuga de tipo sedimentadora tiene únicamente dos configuraciones básicas: la tubular y la de discos. Por el contrario, los filtros centrifugos existen en una gran variedad de formas para operación completamente continua, automática intermitente y manual. La evaluación de su funcionamiento esta basado en aproximaciones empiricas.

El filtro centrifugo es usado normalmente para separar particulas de un lodo y normalmente cuenta con un dispositivo para lavar la fase sólida y eliminar el residuo contaminante de licor madre. En su operación, la fase sólida es soportada por una malla o alguna membrana permeable a través de la cual el líquido puede pasar libremente bajo la acción de la fuerza centrifuga. Su análogo gravitacional es el tamizado.

En general, el residuo de licor madre que contiene la fase solida es una función exponencial del inverso del tiempo de exposición a la fuerza centrifuga y una función del inverso de la fuerza centrifuga aplicada, $\omega^2 r$. Como ninguna de estas funciones ha sido definida adecuadamente, ambos, tanto la fuerza como el tiempo deben ser estudiadas como variables independientes al analizar el funcionamiento del filtro centrifugo en cada

aplicacion.

A una FCR (ξ) dada la capacidad de los filtros centrifugos continuos geoméricamente similares varía por un factor entre el cuadrado y el cubo de la relación de sus diámetros. El valor más bajo se aplica en aquellos casos donde la capacidad para manejar al líquido y por ende el área superficial del filtro, controla. El límite superior es alcanzado en aquellos casos donde el factor controlante es la capacidad de la centrifuga para llevar la fase sólida al grado de purificación requerido.

El filtro centrifugo intermitente se presta a una evaluación más bien crítica y estimaciones de funcionamiento adecuados a partir de datos de pruebas en pequeña escala. Los filtros centrifugos intermitentes existen en dos formas básicas:

- * El tipo de eje vertical de velocidad variable, el cual es descargado a velocidad reducida.

- * El tipo de eje horizontal de velocidad constante, el cual gira a velocidad total através de su ciclo de operación.

En ambos, la malla o elemento filtrante es cilindrico. Para el servicio en las modernas plantas químicas el ciclo de operación puede ser completamente automático, a menudo bajo control de tiempo y hacerse automáticamente repetitivo. El ciclo general de operación cuando la torta requiere un solo lavado es:

- * Tiempo de lavado de acondicionamiento de la malla.

- * Tiempo de aceleración (para el de velocidad variable).
- * Tiempo de alimentación o carga.
- * Tiempo de lavado de la torta.
- * Tiempo de secado.
- * Tiempo de deceleración a velocidad de descarga (para el de velocidad variable).
- * Tiempo de descarga.

El filtro centrífugo intermitente automático está diseñado para procesar una carga a través de un ciclo y para repetir el ciclo automáticamente con cargas sucesivas. Su capacidad es directamente proporcional al tamaño de la carga e inversamente al tiempo requerido para cada ciclo.

Algunas partes de este ciclo son únicamente función del mecanismo de la centrífuga y el tiempo para ellos debe ser obtenido del fabricante. Estas partes son: tiempos de aceleración y deceleración, tiempo de vaciado del tambor y tiempo de descarga. Este último puede ser una función de la densidad u otras características de la torta a descargar, combinada con las características de la centrífuga.

Las partes del ciclo que varían con las consideraciones del proceso son: tiempo de lavado de la malla, tiempo de alimentación, tiempo de lavado de la torta y tiempo de secado. El lavado de la malla normalmente incluye un factor de experiencia. Las otras pueden ser evaluados adecuadamente a partir de pruebas con cualquier otra centrífuga de canasta operada a la FCR de la unidad

propuesta como se describe a continuación.

1) Enjuague de la malla.

El tiempo depende del tipo de producto y del diseño de la centrifuga. Los sólidos se descargan moviendo un cuchillo descargador a una distancia fija de la malla mientras la canasta está girando.

Las descargas sucesivas pueden ocasionar que la permeabilidad de esta capa residual se deteriore por que el cuchillo está friccionando la misma superficie en cada descarga y esto puede ocasionar que la capa residual se compacte y se taponee la superficie por la acción repetitiva del cuchillo descargador.

La capa residual, deseablemente, evita que el cuchillo entre en contacto con la malla filtrante y proporciona una precapa que evita una perdida de finos en las siguientes cargas a través de la malla.

En la mayoría de las aplicaciones, cuando la capa residual se mantiene en menos de 3.2 mm de espesor, un tiempo de lavado de 0.5 a 5.0 s. proporciona el resultado deseado y reestablece la condición deseada de permeabilidad en la capa residual.

2) Alimentación.

Para una centrifuga dada, el tiempo de alimentación es una variable que depende de la velocidad de drenado característica de los sólidos y la concentración de los mismos en el lodo de

alimentación, por ejemplo, la cantidad de licor madre que debe drenar a través de la malla a la velocidad de drenado determinada mientras la carga de sólidos está siendo acumulada en la malla. La velocidad de alimentación debe ser reducida a un valor tal que asegure una distribución uniforme de la torta para evitar el desbalanceo de la centrifuga.

Cuando las partículas de la fase sólida tienen la fuerza mecánica suficiente para resistir la distorsión bajo presión, la velocidad de drenado aumenta con el aumento en la fuerza centrífuga, si se tienen velocidades de drenado de $250 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ o mayores, es independiente del espesor de la torta en un gran intervalo, de 2.5 a 15 cm.

Para sólidos de este tipo, la velocidad de drenado puede ser determinada cargando los sólidos en cualquier centrifuga de canasta -por ejemplo, una máquina de pruebas de 30 cm de diámetro- operada a la FCR de la unidad propuesta, recirculando el licor madre a través de esta torta a una velocidad tal que apenas inunde la torta y midiendo esta velocidad.

Si la experiencia preliminar indica que los sólidos son deformables bajo presión, ó si este fenómeno es presumible, la velocidad de drenado debe ser determinada para una gran cantidad de valores dentro de un intervalo grande de condiciones de fuerza centrífuga y espesor de la torta.

La 'densidad empacada' de los sólidos en la canasta bajo la

fuerza centrífuga debe ser determinada como la relación del peso de la carga al volumen medido y calculado.

El tiempo de alimentación por unidad de espesor de la torta a la FCR es:

$$\text{Tiempo (s/mm)} = \frac{\text{densidad empacada (kg/m}^3\text{)}}{\text{velocidad de drenado (kg/s/m}^2\text{)}} * \frac{1}{1000}$$
$$\frac{100}{\text{conc. en alimentación \%}} \quad \frac{100}{\text{humedad torta \%}} \quad (30)$$

El peso de la carga se calcula como la densidad empacada multiplicada por el volumen de torta calculado al espesor de torta seleccionado para operación.

3) Drene de la cubierta.

Esta etapa depende de la fineza de separación requerida del licor madre y el licor de lavado y del diseño de la máquina (la capacidad de la cubierta de la centrífuga para drenar libremente).

4) Lavado de la torta.

El lavado de la torta debe llevar a cabo la eliminación máxima de licor madre e impurezas contaminantes disueltas con un mínimo de líquido de lavado. El lavado se aplica en la superficie de la torta y se deja que atraviese la torta libremente.

El drene del lavado puede ser determinado con la técnica

descrita para la determinación de la velocidad del licor madre. La determinación de la cantidad de licor madre necesaria se determina experimentalmente. En general, la aplicación de una ó más lavados puede reducir el contenido de impurezas de un 80 a un 95%. Entonces:

Tiempo de enjuague (s) =

$$\frac{\text{peso de la carga (kg)} * \text{cantidad de lavado (kg/kg carga)}}{\text{velocidad de drene (kg/m}^2 \text{ /s)} * \text{área de la malla (m}^2 \text{)}}$$

5) Tiempo de secado.

La relación de tiempo de secado a contenido de fase líquida de la torta en una centrífuga de canasta perforada toma la forma exponencial:

$$\text{Contenido de fase líquida} = e^{-(A+B/t)} \quad (32)$$

donde A y B son funciones de las fase sólida y líquida y de la fuerza centrífuga y t es el tiempo. Esta es una típica función asintótica donde la velocidad de acercamiento a la asintota es una función de la fuerza centrífuga aplicada. En una torta no deformable o ligeramente deformable, entre mayor sea la fuerza centrífuga, menor será el contenido de licor madre ó de lavado residual y más rápido se obtendrá el valor terminal. Los datos experimentales necesarios pueden obtenerse en una sola carga extrayendo muestras de la parte radial más profunda de la torta después de tiempos de secado adecuados. La torta debe ser

resaturada con licor madre o de lavado entre pruebas sucesivas.

6) Tiempo de descarga.

Este tiempo depende de las características de la centrifuga con poco efecto de las características de los sólidos.

7) Tiempo de aceleración y deceleración.

Para la centrifuga de canasta de velocidad variable únicamente, el tiempo depende del diseño de la máquina, peso de la canasta cargada y de la potencia disponible.

CAPITULO VI.

CRITERIOS DE SELECCION DE CENTRIFUGAS.

VI.1. Introducción.

Como se ha descrito en la sección 3.2, la centrifugas pueden clasificarse como sedimentadoras y filtros centrifugos. Los diferentes tipos de centrifugas sedimentadoras pueden a su vez subdividirse en separadores y decantadores, las centrifugas de canasta pueden ser consideradas entre los filtros centrifugos.

Los separadores son centrifugas para separación líquido-líquido, sólido-líquido ó líquido-líquido-sólido. Tienen un tambor tubular, de cámaras anulares ó de discos. Los separadores operan en forma continua con respecto a la descarga de las fases líquidas. Con respecto a los sólidos, la descarga puede ser intermitente, semicontinua, o completamente continua.

Los decantadores tienen normalmente un tambor no perforado y operan continuamente.

Las centrifugas de canasta y filtros centrifugos tienen una pared perforada y dependiendo del tipo operan intermitente, semicontinua o continuamente.

Para definir el marco de aplicación de las centrifugas separadoras, decantadores, de canasta y filtros centrifugos, se deben considerar los siguientes factores:

Campo de aplicación.

Tamaño de los sólidos suspendidos.

Contenido de sólidos en la alimentación.

VI.2. Campo de aplicación.

El separador discontinuo es adecuado para extracción líquido-líquido, separación de mezclas de líquidos y clarificación de líquidos.

El separador autodeslodante, además de lo anterior, puede ser utilizado para concentrar lodos. Los campos de aplicación del tipo de toberas son similares; también cubren la extracción sólido-líquido.

El decantador cubre la mayor cantidad de aplicaciones y por ello es una de las centrifugas más importantes. Un decantador de tres fases separa mezclas de líquidos mientras que simultáneamente concentra los sólidos y funciona como un decantador-extractor.

Las centrifugas de canasta y los filtros centrifugos son centrifugas desaguadoras donde pueden llevarse a cabo lavados. La centrifuga de cuchillo o filtro centrifugo al igual que el decantador tiene una gran cantidad de aplicaciones y es superior a los otros tipos de centrifugas, particularmente en la capacidad de obtención de sólidos secos.

En la figura 15 se muestran los campos de aplicación de los diferentes tipos de centrifugas.

	Sep. Clari- ficador	Sep. Autodes- lodante.	Sep. Toberas	Decanta- dor.	Centrí- fuga de canasta.	Filtro Centrí- fugo.
Extracc. líq-líq.	■	■				
Separac. mezclas líquidas.	■	■	▒	■		
Clarific. líquidos.	■	■	▒	■		▨
Concen- tración de lodos.		■	▒	■		▨
Extracc. sólido- líquido.			▒	■		▨
Deshidrat de susts. amorfás.			▒	■	▨	▨
Desaguado de susts. cristalin				■	▨	▨
Clasific. húmeda.		■	▒	■		

Fig. 15.

VI.3. Tamaño de los sólidos suspendidos.

Cuando se va a elegir una centrífuga tomando como criterio el tamaño de partícula debemos recordar que las centrífugas descritas en el presente trabajo son adecuadas únicamente para dispersiones

gruesas (suspensiones). Un sistema de dispersión es un producto que consiste en varias fases en el cual la fase dispersa está finamente distribuida en un medio dispersante. Ambos, tanto la fase dispersa como la dispersante pueden ser sólidos, líquidos ó gases.

Las dispersiones se clasifican de acuerdo con el tamaño de partícula:

Dispersión	Tamaño de partícula.	Ejemplo.
Molecular	$<0.001 \mu\text{m}$	Soluciones de sales ó moléculas orgánicas simples. Son líquidos totalmente claros.
Coloidal	$0.001 - 0.1 \mu\text{m}$	Soluciones orgánicas ó inorgánicas homogéneas pero opalescentes.
Gruesa	$0.1 - 1.0 \mu\text{m}$	Suspensiones, mezclas turbias a muy turbias.

Fig. 16.

Las dispersiones coloidales pueden ser separadas, dependiendo de las características de las fases, por equipos de ultracentrifugación ó ultrafiltración, mientras que el mecanismo de separación de una dispersión molecular es por ósmosis inversa.

En la tabla siguiente se muestra el intervalo de tamaño de partículas que pueden separar los diferentes tipos de cantrifugas.

Tamaño de partícula (μm).	0.1	1.0	10	100	1000	10000	100000
Separador con tambor clarificador		██					
Separador con tambor autodeslodante		██					
Separador con tambor de toberas		██					
Decantador			██				
Centrifuga de canasta			██				
Filtro centrífugo				██			

Fig. 17.

VI.4. Contenido de sólidos en la alimentación.

De acuerdo con las tablas de comparación entre los diferentes tipos de centrifugas, se observa que los separadores están orientados hacia los líquidos mientras que los decantadores, centrifugas de canasta y cuchilla están más orientados hacia el manejo de sólidos.

En la figura 18 se muestra el criterio de selección de equipos de centrifugación basado en el contenido de sólidos en la alimentación.

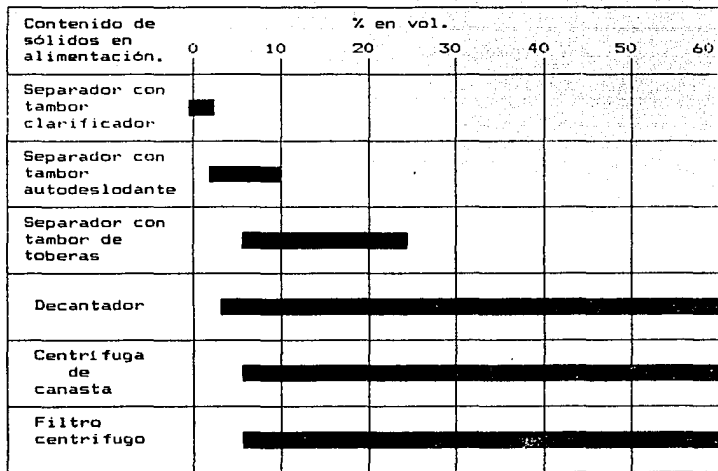


Fig. 18.

Sin embargo para una selección adecuada siempre es recomendable realizar pruebas y basar en ellas la selección final.

Un esquema de trabajo recomendable para la selección de un equipo de centrifugación es el siguiente:

- 1) Definición del problema.
- 2) Realización de pruebas preliminares.
- 3) Análisis de las condiciones del proceso.
- 4) Selección preliminar de equipo.
- 5) Selección de muestras para pruebas.
- 6) Consideración de posibles modificaciones a las condiciones del proceso.
- 7) Selección final.

1) Definición del problema.

El problema de separación debe estar definido en el marco de trabajo del proceso completo. En un proceso químico típico, esto empezaría con el reactor ó cristalizador como fuente y terminaría con el producto final ya terminado. Este método muestra la interacción entre las diferentes etapas del proceso y facilita la optimización de los costos totales, de los cuales la etapa de separación es tan sólo un componente.

2) Pruebas preliminares.

La información cuantitativa es utilizada en este punto en la selección del proceso para indicar si el sistema se separará rápida, lentamente ó si no se separará, en pruebas por a) gravedad, b) centrifuga de tubos y c) en un embudo Büchner.

3) Análisis de las condiciones del proceso.

A partir de los datos obtenidos en el apartado anterior puede ser posible hacer cuando menos proposiciones preliminares respecto a las condiciones del proceso. Estas incluirían temperatura, sellos para vapor ó gas, características corrosivas de líquidos, tamaño y características abrasivas de los sólidos, necesidad de enjuague de los sólidos y servicios a la unidad entre otras.

4) Selección preliminar de equipo.

Los catálogos de centrifugas son una referencia conveniente que puede complementarse con la experiencia del representante del fabricante. Como etapa preliminar a ésta el fabricante debe presentar un cuestionario de datos necesarios para la selección. También pueden usarse como guía preliminar gráficas como la figura

(15) donde se muestran algunos tipos de centrifugas y las separaciones que pueden llevar a cabo.

5) Selección de muestras para pruebas.

Ninguna prueba con muestras carece de sentido a menos que la muestra no represente realmente las condiciones del proceso que nos atañe. Los resultados obtenidos y reportados serán únicamente válidos para la corriente cuya muestra se está analizando. Si la muestra no pierde alguna de sus características al transportarla fuera de la planta, es más conveniente realizar las pruebas en el laboratorio del fabricante. En caso contrario será necesario realizar las pruebas en línea, la mayoría de los fabricantes cuenta con equipo de pruebas para estas circunstancias.

6) Modificaciones a las condiciones del proceso.

En este punto puede indicarse la conveniencia de modificaciones al proceso junto con pruebas adicionales para optimizar el funcionamiento del proceso.

7) Selección final.

Después de estas etapas el campo de elección debe estar limitado a uno ó dos tipos de centrifugas y sus proveedores. La centrifuga debe trabajar confiablemente sin disminución de efectividad en un periodo de tiempo más ó menos largo. Debe funcionar económicamente con un mínimo de trabajo humano de operación y mantenimiento.

Los problemas de separación pueden ser resueltos normalmente con la aplicación de las centrifugas comercialmente disponibles

a veces con modificaciones relativamente pequeñas.

La figura 19 sirve como una guía para indicar cuales tipos de centrifugas pueden llevar a cabo una separación determinada. Está basada en flujos de efluente clarificado nominales y valores de Q_0/Σ aplicables; éstos últimos, equivalentes al doble de las velocidades de sedimentación gravitacional teóricas. En separaciones sólido-líquido, la velocidad del efluente representa la corriente clarificada del medio líquido y no incluye el volumen de sólidos descargados ni el volumen del medio descargado con los sólidos. La velocidad del efluente de las separaciones líquido-líquido se refiere a la fase continua que ocupa la porción mayor en la mezcla sea ligera o pesada. Los intervalos de flujo para un equipo en particular no representan sus límites absolutos sino los flujos normales para una buena clarificación en aplicaciones típicas. De igual forma, partículas mayores a los diámetros indicados pueden sedimentarse. Asimismo como una guía adicional, el valor Q_0/Σ se ha correlacionado con el diámetro de partícula de la esfera equivalente de la ley de Stokes. Se han supuesto una $\Delta\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$ y una viscosidad de 1 mPa s ($=\text{cP}$); de esta forma si se desea una conversión a otras características físicas se requiere que la escala de tamaño de partícula se ajuste a su valor de Q_0/Σ mediante la relación $Q_0/\Sigma = 10^{-7} * 1.09 \Delta\rho/\mu$ con $\Delta\rho$ en g/cm^3 y μ en Pa s . Para la interpretación del tamaño de partícula, deben tomarse en cuenta dos factores, la escala se refiere al valor de separación del 50% de las partículas y bajo las condiciones reales de centrifugación el valor de Σ debe ser corregido por factores de eficiencia para obtener el valor teórico de Σ (ver el capítulo 4).

Si se utiliza la figura 19 puede indicarse qué equipos pueden llevar a cabo una separación determinada; otras características harán la selección más precisa. Ejemplo :

Se va a separar una mezcla sólido-líquido de arcilla de caolín de una suspensión acuosa, se tienen los siguientes datos:

$$Q_0 = 3.15 \text{ m}^3/\text{s} \quad (50 \text{ gpm}).$$

$$\rho_p = 2.55 \text{ kg/dm}^3.$$

$$D_p = 0.25 - 30 \text{ } \mu\text{m} \text{ con } 55\% < 2 \text{ } \mu\text{m}.$$

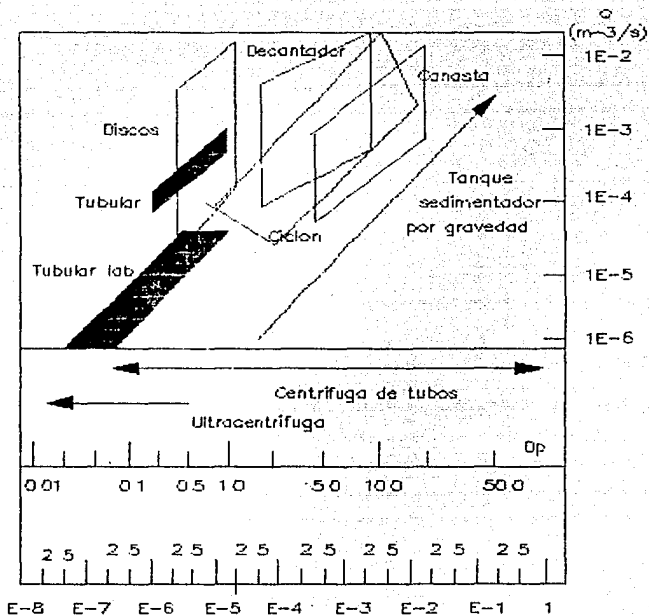
El punto $1.0 \text{ } \mu\text{m}$ en la escala de tamaño de partícula sería equivalente a $Q_0/\Sigma = 1.69 \text{ m}^3/\text{s}$ como se observa en la gráfica. Si suponemos que se requiere una alta recuperación, se requiere una centrifuga de discos y la recuperación de partículas mayores de $0.4 \text{ } \mu\text{m}$ es satisfactoria. El valor Q_0/Σ equivalente a $0.4 \text{ } \mu\text{m}$ en la escala ajustada es $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$\Sigma = \frac{(3.15 \text{ m}^3/\text{s}) (1 \text{ m}^3/\text{s})}{(2.3) (1 \text{ m}^3/\text{s})} = 1.3695 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como la arcilla tiende a compactarse fuertemente, únicamente el tambor de toberas, de descarga continua podría ser utilizado.

Si se deseara la clasificación de los sólidos, muchos otros tipos de centrifugas podrían ser utilizados. Si se supone ahora que únicamente se requiere separar las partículas mayores de $2 \text{ } \mu\text{m}$ de la suspensión y que ésta corriente debe ser altamente concentrada para ser desechada, la figura 19 muestra que teóricamente pueden ser utilizados un decantador centrifugo, una centrifuga de canasta ó un ciclón.

De acuerdo con lo que se ha descrito en el capítulo 3 y de experiencias reportadas (17) se sabe que los ciclones no pueden concentrar la corriente tanto como las centrifugas así que no resultan adecuados para este caso. Si la concentración de la alimentación fuera baja, una centrifuga de canasta sería usada para descargar los sólidos en forma intermitente. Sin embargo, un decantador centrífugo logra una concentración casi tan buena como la de la centrifuga de canasta, puede manejar una mayor cantidad de sólidos en la alimentación y es un clasificador más eficiente; por lo que sería la mejor elección y de hecho es éste el que se emplea en la industria del caolín.



$$Q/\Sigma = 2 Vg$$

D_p (μm) para $\Delta \rho = 10 \text{ g/cm}^3$ y $\mu = 1 \text{ mPa s}$

Fig 19 SELECCION DE CENTRIFUGAS

CAPITULO VII.

DESCRIPCION DEL EQUIPO.

VII.1. Descripción general.

En el diseño de la práctica de centrifugación para el Laboratorio de Ingeniería Química se utilizó un separador de laboratorio marca Westfalia Separator modelo LWA-205 propiedad del mismo laboratorio.

El separador centrífugo LWA-205 es una máquina de laboratorio ó planta piloto que tiene una gran variedad de aplicaciones. Este equipo puede ser empleado en la estimación de equipos mayores para un proceso específico ya que como máquina de pruebas cuenta con los accesorios necesarios para hacer las funciones de varios tipos de centrifugas.

El separador LWA-205 puede funcionar como centrifuga de cámaras, de discos ó de toberas, dependiendo de los accesorios que se le adapten.

Cuenta con un motor eléctrico de 0.45 kw para 220/380 v de tres fases, capaz de lograr que la centrifuga desarrolle una velocidad de hasta 12 000 rpm.

En las tablas siguientes se muestran los nombres de los accesorios que se deben utilizar para armar la centrifuga en cada una de sus diferentes formas.

TAMBOR DE CAMARAS CON ACCESORIOS DE ALIMENTACION Y DESCARGA

Número en la figura	Nombre de la parte.	Cantidad.
-	Tambor completo (Nos. 1 - 7).	1
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 pesados	1
8b	Colector de líquidos ligeros	1
8c	Colector de inundación	1
9	Recipiente interior	1
10a	Llave de alimentación	1
10b	Recipiente de alimentación	1

Ver figuras 20 y 23.

TAMBOR DE DISCOS CON ACCESORIOS DE ALIMENTACION Y DESCARGA

Número en la figura.	Nombre de la parte	Cantidad.
-	Tambor Completo (Nos. 1-8).	1
1	Empaque de hule	1
2	Distribuidor	1
3a	Disco inferior	1
3b	Discos	16 - 18
4	Disco separador	1
5	Cubierta del tambor	1
6	Tuerca del tambor	1
7	Base del tambor	1
8	Tornillo regulador de efluente ligero	1
9a	Colector de líquidos pesados	1
9b	Colector de líquidos ligeros	1
9c	Colector de inundación	1
9d	Recipiente interior	1
10a	Llave de alimentación	1
10b	Recipiente de alimentación	1

Ver figuras 21 y 23.

TAMBOR DE TOBERAS CON ACCESORIOS DE ALIMENTACION Y DESCARGA

Número en la figura.	Nombre de las partes	Cantidad.
-	Tambor completo (Nos 1-9).	1
1	Base del tambor	1
2	Empaque de hule	1
3	Distribuidor	1
4a	Disco inferior	1
4b	Discos	22 - 24
4c	Disco superior	1
5	Cubierta del tambor	1
6	Tuerca del tambor	1
7	Toberas	4
8	Empaques	4
9	Conducto para lodos	2
10	Colector de lodos	1
11	Tubo de descarga	1
12	Colector de líquido clarificado	1
13	Recipiente interno	1
14	Llave de alimentación	1
15	Recipiente de alimentación	1

Ver figuras 22 y 24.

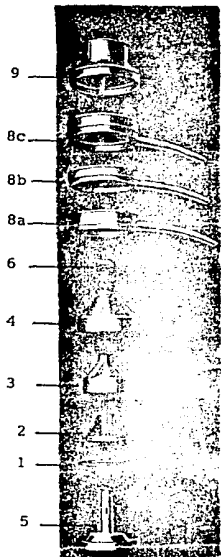


FIG. 20
TAMBOR DE CAMARAS

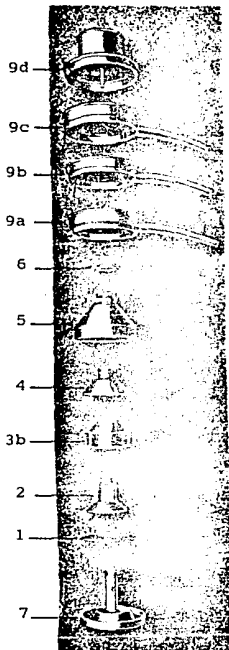


FIG. 21
TAMBOR DE DISCOS

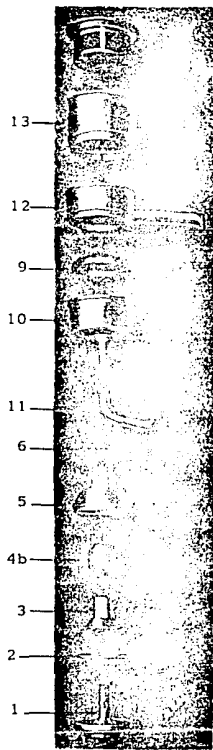
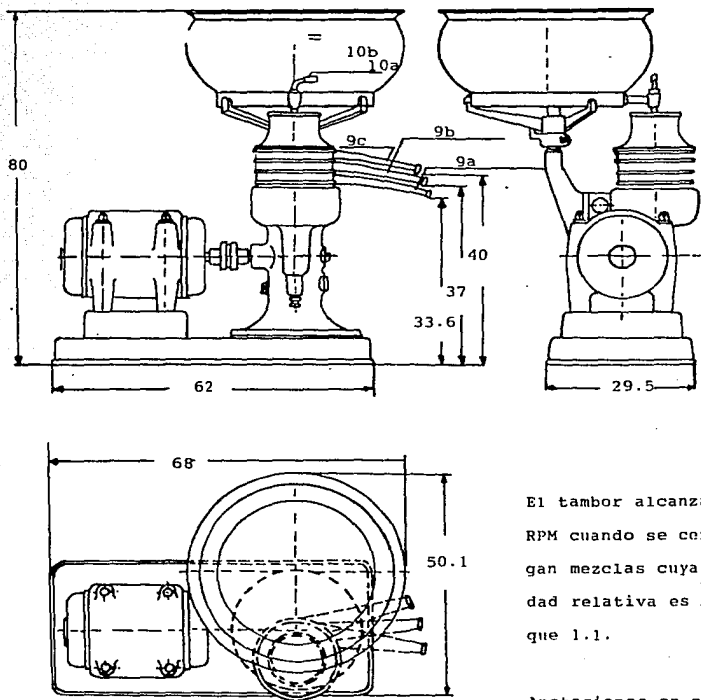


FIG. 22
TAMBOR DE TOBERAS

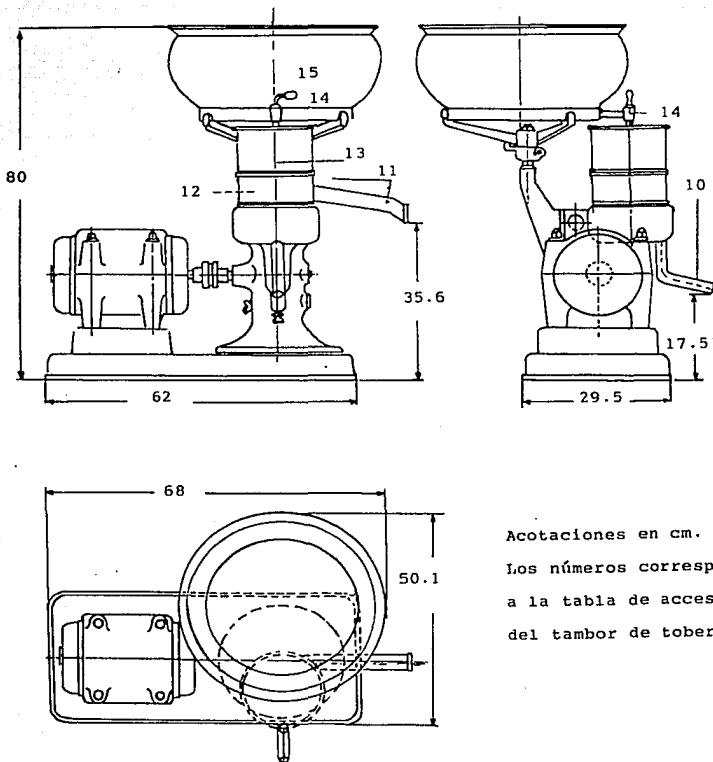
SEPARADOR LWA-250 CON TAMBOR DE DISCOS.



El tambor alcanza 12000 RPM cuando se centrifugan mezclas cuya densidad relativa es menor que 1.1.

Anotaciones en cm.

Fig. 23. Plano de inatación del tambor de discos.



Acotaciones en cm.

Los números corresponden
a la tabla de accesorios
del tambor de toberas.

Fig. 24. PLANO DE INSTALACION DEL TAMBOR DE TOBERAS

VII.2. Montaje del equipo (LWA-205).

Dentro del laboratorio de Ingeniería Química, el separador centrífugo se colocó en el área que corresponde a los equipos de separación mecánica, siguiendo la distribución que guarda el laboratorio.

El equipo se localiza ahora en la parte norte del laboratorio junto a los clasificadores de granos y al molino.

El LWA-205 no necesita de instalaciones especiales, tan solo se requiere de una mesa con superficie plana y bien nivelada y una conexión trifásica para el motor. Como no se contaba con estos elementos fué necesario reparar una mesa propiedad del laboratorio, pintarla, adaptarle una cubierta en buen estado, recortarle las patas y al separador hubo que colocarle un cable y clavija ya que carecía de ellos.

VII.3. Manual de operación, seguridad y mantenimiento del LWA-205.

I.- Instrucciones para la instalación, mantenimiento y operación del equipo.

1.- El equipo debe ser instalado de acuerdo con cualquiera de las figuras 20 - 24 anexas.

2.- No es necesario asegurar la máquina al piso pero debe estar bien nivelada.

3.- El tambor, visto desde arriba debe girar en el sentido de las manecillas del reloj. Cuando es impulsado por un motor de

C.A., el sentido de la rotación puede invertirse intercambiando dos fases.

4.- La velocidad máxima del tambor (12 000 rpm) es alcanzable cuando el material a centrifugar tiene una densidad relativa de 1.1.

5.- Es conveniente cubrir el eje cuando la máquina sea limpiada ó esté fuera de servicio.

II.- Lubricación.

Se debe cambiar el aceite cada 14 días de operación. Conviene limpiar la cámara con gasolina antes de agregar el aceite. Cuando se agregue el aceite el nivel no debe sobrepasar la mitad de la mirilla. Se puede usar un aceite para automóvil de tipo SAE 40.

III.- Armado de los Tambores.

A.- Tambor de Cámaras (figuras 20 y 23).

1.- Insertar el empaque de hule (1) en la ranura de la base del tambor (5).

2.- Colocar el ala interior (2).

3.- Colocar la cámara interior (3) de tal forma que su guía embone con la del ala (2).

4.- Colocar la cubierta del tambor (4) y apretar la tuerca (6) con la llave correspondiente.

5.- Colocar el tambor armado en el eje asegurándose que entre en la ranura de este.

6.- Ensamblar los siguientes accesorios:

colector de líquidos ligeros (8a),

colector de líquidos pesados (8b),
colector de inundación (8c),
recipiente interior (9) y
recipiente de alimentación (10b).

B.- Tambor de Discos (figuras 21 y 23).

1.- Colocar el empaque (1) en la ranura de la base del tambor (7).

2.- Colocar el distribuidor (2) junto con la hacina de discos en su lugar. Se debe comprobar que el disco inferior (3a) sea el que está en el fondo. Este disco tiene espaciadores en ambos lados.

3.- Coloque el disco separador (4).

4.- Coloque la cubierta del tambor (5) y apriete la tuerca (6) con la llave correspondiente.

5.- Colocar el tambor completo sobre el eje asegurándose que la guía entre en la ranura del eje.

6.- Armar el equipo con los accesorios siguientes:

receptor de líquidos ligeros (9a),
receptor de líquidos pesados (9b),
colector de inundación (9c),
recipiente interior (9d) y
recipiente de alimentación (10b).

C.- Tambor de Toberas (figuras 22 y 24).

1.- Colocar el receptor de lodos (10) en la canasta de la centrifuga.

2.- Colocar el empaque (2) en la ranura de la base del tambor (1).

3.- Colocar el distribuidor con los discos en la base del tambor, asegurándose que el disco inferior esté en el fondo. Este disco tiene espaciadores en ambos lados.

4.- Colocar el disco superior (4c). Este disco no tiene separadores en la cara superior.

5.- Colocar la cubierta del tambor (5) y apretar la tuerca (6) con la llave correspondiente.

6.- Colocar el tambor completo en el eje asegurándose que la guía del tambor entre en la ranura del eje.

7.- Armar el equipo con los siguientes accesorios.

Colector de líquido clarificado (12),
recipiente interior (14) y
recipiente de alimentación (15).

IV.- Recomendaciones durante la operación.

Encender el motor y abrir la llave de alimentación una vez que el tambor ha alcanzado su velocidad máxima.

A.- Tambor de cámaras:

La eficiencia de la clarificación depende del flujo.

Si la eficiencia de clarificación no es adecuada, reduzca el flujo. Los sólidos se sedimentarán en las paredes internas del tambor por lo que el efecto de clarificación disminuye conforme el espacio para sólidos se va llenando. Cuando el efluente fluye turbio, el tambor necesita limpieza.

El líquido remanente en el tambor se puede extraer

alimentando agua ó algún disolvente.

B.-Tambor de Discos.

El tambor de discos se utiliza para separar y descargar dos líquidos continuamente mientras los sólidos se depositan en el interior del tambor.

Los líquidos pesados, por ejemplo agua, salen por la descarga inferior y los más ligeros por la del centro. La descarga superior funciona cuando la alimentación es demasiado grande, el tambor está lleno de sólidos ó el tornillo regulador está muy cerrado.

Antes de separar, aceite por ejemplo, el tambor debe llenarse con agua. Esto crea un sello líquido entre la pared del tambor y los discos lo que permite únicamente a tal cantidad de aceite pasar a través de los canales del disco separador mientras se alimenta el material a tratar.

Cuando se desee separar aceite y agua, la temperatura debe ser lo más alta posible.

Ajuste del tornillo regulador.

Cuando hay grandes diferencias en las densidades y cuando el porcentaje de sólidos es alto, girar el tornillo regulador (se encuentra en el cuello del tambor) en sentido o puesto al de las manecillas del reloj.

Cuando la diferencia en densidades es pequeña y la cantidad de sólidos también, gire el tornillo en el sentido de las

manecillas del reloj.

Si algún líquido sale contaminado con el otro, esto puede solucionarse ajustando el tornillo, girándolo en el sentido de las manecillas del reloj si el líquido ligero sale por abajo y en sentido opuesto si el líquido pesado sale por arriba.

C.- Tambor de toberas.

El tambor de toberas se utiliza para la concentración de sólidos de un líquido. El líquido clarificado se descarga por la parte superior y el lodo concentrado por la inferior.

Las toberas tienen que tener siempre todas de la misma apertura. Si se obtiene una concentración muy pobre, verifique que las toberas no estén bloqueadas.

V.- Recomendaciones Generales.

Cuando ocurran complicaciones en cualquiera de los tres casos anteriormente descritos se debe verificar lo siguiente:

- 1.- ¿Se ha alcanzado la velocidad máxima?
- 2.- ¿Está bien armado el tambor?
- 3.- ¿Hay desgaste en las partes de transmisión?
- 4.- ¿Se están usando las partes correctas del tambor?

Se recomienda verificar que el tambor esté bien apretado antes de colocarlo sobre el eje de la centrífuga, no tocar la centrífuga ni sus partes durante la operación y esperar a que la centrífuga se detenga por completo cuando se quiera retirar el tambor.

CAPITULO VIII.

PARTE EXPERIMENTAL.

VIII.1. Diseño de los experimentos.

Para encontrar experimentos óptimos para el desarrollo de la práctica, se requería que se satisficieran ciertos requisitos:

- 1.- Sustancias económicas.
- 2.- Manifestación clara del fenómeno estudiado (objetividad).
- 3.- Disponibilidad de las sustancias.
- 4.- Desgaste del equipo por las sustancias.
- 5.- Grado de separación alcanzado.

Con estos criterios se realizaron pruebas con diversas mezclas y de esta forma se podría encontrar que mezclas resultarían más adecuadas en experimentaciones sucesivas.

El desarrollo de las experimentaciones se detalla a continuación con las observaciones más sobresalientes a que dieron lugar.

I. Experimentos con el tambor de Cámaras.

Al utilizar este tambor, la centrifuga debe armarse de acuerdo con las figuras 20 y 23 del presente trabajo. El tambor de cámaras se utiliza para clarificar líquidos y aunque el motor de la máquina provee fuerza suficiente para realizar separaciones sólido-líquido difíciles el volumen disponible del tambor para

alojar solidos no es muy grande, por lo que se recomienda no utilizar suspensiones con concentraciones mayores del 2% en volumen.

Los experimentos consistieron en centrifugar diferentes mezclas, todas ellas con diferentes concentraciones y flujos de alimentación. Los sistemas probados fueron:

- CaCo₃ - agua.
- PVC - agua.
- almidón - agua.
- 2 etil hexanol - agua.

Muestra de agua residual con PVC - agua.

Para el desarrollo de los experimentos se utilizó el siguiente material:

- Probetas graduadas de 2 000 ml. (3).
- Probeta graduada de 1 000 ml. (1).
- Cubetas de plástico. (3).
- Densímetro (0.8 - 2.0 den. rel.) (1).
- Vasos de precipitados de 250 ml. (3).
- Vaso de precipitados de 500 ml. (2).
- Agitador de vidrio. (1).
- Balanza granataria con pesas de 1 000 y 500 g.
- Espátula. (1).
- Cronómetro. (1).

Sustancias:

- Carbonato de calcio.
- PVC.
- 2-etil-hexanol.

- almidón.
- agua.

Procedimiento:

- 1) Preparar suspensiones del sistema a estudiar en tres concentraciones diferentes.
- 2) Vaciar una de las suspensiones en el recipiente de alimentación de la centrifuga.
- 3) Llenar el tambor de la centrifuga con agua.
- 4) Conectar la centrifuga y esperar a que alcance su velocidad máxima.
- 5) Abrir la válvula de alimentación y tomar el tiempo cuando empiece a caer el líquido.
- 6) El efluente de la centrifuga debe recogerse en las cubetas.
- 7) Cuando la alimentación ha cesado, se mide el tiempo, el volumen de líquido recolectado y se desconecta el equipo.
- 8) Desarmar el tambor y limpiarlo.
- 9) Repetir el experimento con alguna de las otras concentraciones ó variando la apertura de la válvula de alimentación.
- 10) Repetir los pasos 1-9 para las diferentes mezclas.

VIII.2. Desarrollo de los experimentos.

Los resultados obtenidos en los diferentes experimentos se muestran a continuación en las tablas 1-5, donde:

$\text{Flujo} = \text{volumen alimentado} / \text{tiempo que tardó en vaciarse el recipiente de alimentación.}$

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{conc.i} - \text{conc.f}}{\text{conc.i}} * 100$$

TABLA I CARBONATO DE CALCIO - AGUA.

Corrida:	1	2	3	4	5
Temp. (°C).	21	21	21	21	21
Conc. inic. (% vol.)	0.1	0.1	1.0	1.0	10.0
Con. final (g/l).	0.0	0.0	0.0	0.0	*
Dens. rel. suspensión	1.0	1.0	0.98	0.98	0.95
Dens. rel. efluente	1.0	1.0	1.0	1.0	*
Flujo (l/s)	8.33E-3	0.03	9.33E-3	0.03	8.89E-3
Vol. agua inicial (l)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Vol. agua final (l)	3.990	3.990	3.985	3.985	*
Eficiencia	100	100	100	100	*

Fig. 25.

TABLA 2. AGUA-PVC.

Experimento	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	19	19	19	19	19
Conc. inic. (% vol).	1.4	1.4	0.5	0.5	5.0
Conc. final. (g/l)	0.0	0.0	0.0	0.0	*
Densidad relativa suspension.	0.97	0.97	0.98	0.98	0.95
Densidad relativa efluente.	1.0	1.0	1.0	1.0	*
Flujo (l/s)*10 ³	24.0	5.33	31.0	6.78	11.0
Volumen inic. (l)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Volumen recuperado (l)	4.990	4.990	4.990	4.990	*
Eficiencia	100	100	100	100	100

Fig. 26.

TABLA 3. AGUA-PVC RESIDUAL.

Experimento	1	2
Flujo (l/s)	8.33 $\times 10^{-3}$	0.01
Concentración inicial (g/l)	14.0	14.0
Concentración final (g/l)	0.0	1.0
Temperatura ($^{\circ}$ C)	20.0	20.0
Eficiencia de sep.	100.0	92.86

Fig. 27.

TABLA 4. AGUA-ALMIDON.

Experimento	1	2	3
Flujo (l/s)	8.75×10^{-3}	0.027	9.35×10^{-3}
Concentración inicial. % vol.	2.0	2.0	1.0
Concentración final. % vol.	2.0	2.0	1.0
Volumen inicial (l)	4.0	4.0	4.0
Volumen recuperado (l)	0.0 *	0.0	0.0
Temperatura (°C)	19.0	19.0	19.0
Eficiencia	0.0	0.0	0.0

Fig. 28.

EXPERIMENTO 5.2-ETIL-HEXANOL.

En este experimento se tomaron 5 l de 2-etil-hexanol sucio, tal como sale de la práctica de destilación por arrastre con vapor para centrifugarlo y separar alguna impureza que pudiera contener. Con este procedimiento se buscaba rehabilitar el 2-etil-hexanol para reutilizarlo en la práctica mencionada.

El 2-etil-hexanol antes de ser centrifugado presenta un color amarillento muy ligero, se aprecian algunas impurezas sólidas a simple vista, se observan unas gotas de grasa flotando en la superficie y gotas de agua en el fondo. Después de la centrifugación se han eliminado todas las impurezas sólidas y el 2-etil-hexanol no presenta ningún color ni residuos de agua ó grasa. Por otra parte entre los discos del tambor se puede apreciar una pequeña cantidad de grasa y en las paredes del mismo las impurezas sólidas por lo que podemos considerar como una operación adecuada la centrifugación del 2-etil-hexanol para su purificación.

II.-Experimentos con el Tambor de Discos.

Para utilizar este tambor debe armarse la centrifuga de acuerdo con las figuras 21 y 23 del capítulo anterior.

El tambor de discos se utiliza para separar líquidos inmiscibles continuamente mientras que al mismo tiempo se eliminan pequeñas cantidades de contaminantes sólidos.

Los experimentos con este tambor incluyen pruebas con los sistemas siguientes:

- agua-diesel,
- agua-benceno y
- agua-2-etil-hexanol.

El procedimiento experimental y el material utilizado son los mismos que en el caso anterior. Las recomendaciones de operación, seguridad y mantenimiento deben seguirse de acuerdo al manual correspondiente del capítulo anterior.

Los resultados experimentales se muestran a continuación:

A.Sistema Agua-Diesel.

Para esta prueba se mezclaron agua y diesel en diferentes proporciones, se determinaron densidades antes y después de la operación, se midieron los volúmenes totales alimentado y recogido y se calculó la eficiencia en base a la cantidad de diesel residual en el agua efluente. Ver tabla 5.

B.Sistema Agua-Benceno.

Se mezclaron agua y benceno siguiendo el procedimiento arriba descrito y se calculó la eficiencia en base al contenido de benceno en el agua efluente.

C.Agua-2-etil-hexanol.

Se siguió el mismo procedimiento con la eficiencia calculada para el contenido de 2-etil-hexanol contaminante del efluente.

TABLA 5. AGUA-DIESEL.

Experimento.	1	2	3	4
Flujo (l/s):	0.01121	0.056	0.00496	0.046
Temperatura (°C)	18	18	18	18
Concentración inicial % vol. emulsión.	D 40.0 A 60.0	40.0 60.0	20.0 80.0	20.0 80.0
Concentración final % vol. efluente.	0.0	*	0.0	3.0
Vol. agua inicial. (l)	3.0	3.0	4.0	4.0
Vol. agua final. (l)	3.0	*	4.0	3.1
Densidad relativa inicial.	agua: 1.0 diesel: 0.824 emulsión: 0.900	1.0 0.824 0.900	1.0 0.824 0.950	1.0 0.824 0.950
Densidad relativa final.	agua: 1.0 diesel: 0.82	*	1.0 0.82	1.0 0.82
Eficiencia:	100.0	*	100.0	92.5

Fig. 29.

TABLA 6. AGUA-BENCENO.

Experimento:	1	2	3	4
Flujo (l/s):	0.0031	0.0588	0.020833	0.05882
Temperatura (°C)	18	18	18	18
Concentración inicial % vol. Benceno	20	20	10	10
Concentración final % vol. benceno.	0.0	0.0	0.0	0.0
Densidad relativa inicial.	agua: 1.0 benceno: 0.875 emulsión: 0.970	1.0 0.875 0.970	1.0 0.875 0.985	1.0 0.875 0.985
Densidad relativa final.	agua: 1.0 benceno: 0.875	1.0 0.900	1.0 0.875	1.0 0.940
Vol. inic. (l)	agua: 4.0 benceno: 1.0	4.0 1.0	4.5 0.5	4.5 0.5
Vol. final (l)	agua: 4.0 benceno: 1.0	3.750 1.250	4.5 0.5	3.200 1.800
Eficiencia:	100	93.75	100	71.11

Fig. 30.

TABLA 7. AGUA-2-ETIL-HEXANOL.

Experimento	1	2	3	4
Flujo (l/s):	0.01	0.0166	0.0166	0.00333
Volumen agua: inicial 2-eh: (l). total:	2.0 2.0 4.0	3.0 1.0 4.0	4.0 trazas 4.0	trazas 4.0 4.0
Volumen agua: recupe- 2-eh: redo (l). total:	2.0 2.0 4.0	3.0 1.0 4.0	3.975 0.025 4.000	- 3.864 -
Densidad agua: relativa 2-eh: inicial. mezcla:	1.0 0.83 0.91	1.0 0.83 0.94	1.0 0.83 1.0	1.0 0.83 0.83
Densidad agua: relativa 2-eh: final.	1.0 0.83	1.0 0.83	1.0 -	- 0.83
Concentración inicial. (% vol 2-eh)	50	25	0.00625	96.6
Concentración final. (% vol 2-eh)	100	100	100	100
Eficiencia:	100	100	100	100

Fig. 31.

III.-Experimentos con el Tambor de Toberas.

Este tambor se utiliza para concentrar suspensiones, obteniéndose por un lado un lodo y por el otro un líquido prácticamente libre de material sólido en suspensión.

Para utilizar este tambor, la centrifuga debe armarse de acuerdo a los planos 22 y 24 del capítulo anterior.

El material utilizado y el procedimiento experimental es el mismo que en los casos anteriores.

Los experimentos con este tambor incluyeron pruebas con diversos materiales a diferentes concentraciones y con diferentes velocidades de alimentación pero los resultados obtenidos no son muy convincentes. A continuación se detallan estos experimentos.

A. Agua-CaCO₃.

Esta prueba se realizó con concentraciones diferentes de suspensión (0.5, 1.0 y 2.0 % vol.) sin embargo después de centrifugar se observa que todo el CaCO₃ se ha sedimentado en la pared interna del tambor y el líquido ha salido completamente limpio, mientras que no ha habido concentración ni formación de lodo líquido.

B. Agua-PVC.

Se observa lo mismo que en el experimento anterior, hay separación sólido-líquido pero no hay concentración de lodo. En este caso también fluye el líquido limpio hacia afuera, mientras

los sólidos se depositan en la pared interna del tambor.

C. Agua-PVC residual.

Tampoco se observa la formación de un concentrado. Se obtiene un líquido clarificado completamente transparente y una torta de sólidos en el interior.

D. Agua-almidón.

En este experimento el fluido de alimentación sale tanto como por las toberas como por la salida del líquido clarificado sin ninguna alteración, es decir, no se lleva a cabo ni separación ni concentración.

E. Agua-jugo de piña.

Se alimentó jugo con una concentración baja a la centrifuga obteniéndose por las toberas un líquido amarillo oscuro y por el conducto superior un líquido amarillo claro, sin embargo el líquido oscuro no presenta las propiedades del jugo, no tiene olor ni sabor. Por otra parte en el interior del tambor se aprecia una torta de sólidos de color amarillo con olor muy fuerte a piña.

F. Agua-Fluoresceína.

En este experimento se utilizó un gramo de fluoresceína disuelto en cinco litros de agua. Se alimentó a la centrifuga y se obtuvieron dos líquidos que a simple vista mostraban una diferencia apreciable en la intensidad de su coloración, sin embargo, este resultado es únicamente de apreciación.

CAPITULO IX.

EVALUACION Y SELECCION DE LOS SISTEMAS MAS APROPIADOS PARA INCLUIR EN UNA PRACTICA DE CENTRIFUGACION.

Para elegir el sistema más apropiado se preparó una escala de valores de las características más importantes que buscamos en cada mezcla.

En el capítulo anterior se mencionaron las variables que se tomarían en cuenta para la selección, ahora se le dará a cada característica una escala de valores y un porcentaje de importancia en la clasificación final.

Característica.	Escala.	Porcentaje.
Separación.	0 - 10	30%
Objetividad.	0 - 10	30%
Disponibilidad.	0 - 8	20%
Desgaste del equipo.	0 - 7	15%
Costo.	0 - 5	5%

De esta forma, tenemos los siguientes resultados:

I. Tambor de Cámaras.

Sistema.	Agua/CaCO ₃	Agua/PVC ¹	Agua/PVC ²	Agua/ Almidón
Separación	10	10	10	0
Objetividad	10	10	10	0
Desgaste del equipo	7	6	6	7
Disponibilidad	8	7	6	7
Costo	5	5	5	5
Total	8.9	8.55	8.35	1.3

La mezcla más adecuada para centrifugar en el tambor de cámaras es agua/CaCO₃, ya que es la alcanza el valor más alto, sin embargo, la diferencia de calificación entre las pruebas con PVC es mínima y de acuerdo a la experiencia adquirida en el desarrollo de los experimentos, se puede realizar una práctica satisfactoria con cualquiera de estas mezclas. Aunque se recomienda la mezcla agua/CaCO₃, por que es la sustancia de la cual se tiene una disponibilidad mayor en el laboratorio.

1. PVC en polvo.
2. PVC en una muestra de agua residual.

II. Tambor de Discos.

Sistema.	Diesel-Agua	Benceno-Agua	Zetilhex-Agua
Separación	10	10	10
Objetividad	10	9	10
Disponibilidad	6	7	8
Desgaste del Equipo.	7	7	7
Costo	5	4	5
Calificación	8.2	8.35	8.90

III. Tambor de Toberas.

De los resultados obtenidos ninguno arroja una demostración clara y convincente del proceso que debe llevar a cabo este tambor. El único que aparentemente da un muestra de la capacidad concentradora del tambor es la mezcla agua-fluoresceína ya que se observa una intensidad de color ligeramente mayor en el líquido que sale por el conducto de concentrado.

CAPITULO X

CONCLUSIONES.

Con los datos reportados en las tablas anteriores podemos establecer qué mezclas son más adecuadas para centrifugar y las condiciones del experimento.

Las mezclas recomendadas para centrifugar son:

- Agua-CaCO₃, en el tambor de toberas.
- Agua-2 etil hexanol, en el tambor de discos.
- Agua-fluoresceína, en el tambor de toberas.

Notas:

- 1) En el tambor de discos es posible usar cualquiera de las mezclas propuestas ya que todas ofrecen buenos resultados.
- 2) No se deben alimentar concentraciones mayores al 3% en volumen ya que esto produce una rápida saturación del espacio para almacenar sólidos en los tambores.
- 3) Es muy conveniente alimentar agua de lavado una vez que se ha alimentado toda la mezcla.
- 4) Cuando se utilice el tambor de cámaras debe llenarse con agua antes de empezar la operación.

Para la limpieza de los accesorios debe utilizarse agua, jabón y una fibra no rasposa ni dura para evitar rayar el tambor o

sus accesorios, se deben enjuagar perfectamente y guardarse completamente secos.

Es muy importante no golpear ninguna de los accesorios de la centrífuga, sobre todo las partes del tambor ya que puede provocarse un desbalanceo que traería serias consecuencias.

No se deben centrifugar materiales que ataquen al acero inoxidable, sustancias inflamables ó volátiles, sustancias que desprendan iones Cl^- . Tampoco deben centrifugarse suspensiones que contengan partículas metálicas.

CAPITULO XI.

RESUMEN

La centrifugación es una forma de separación mecánica que se basa en la diferencia de densidad que existe entre los componentes de una mezcla. Este tipo de separación tiene una gran variedad de aplicaciones ya que se pueden separar mezclas líquido-líquido, líquido-sólido y líquido-líquido sólido. Para llevar a cabo estas separaciones existen 2 tipos básicos de centrifugas, las centrifugas sedimentadoras y las filtros centrifugos. La diferencia principal entre ellas es que mientras que en las centrifugas sedimentadoras la fase líquida es continua y las partículas del sólido son forzadas a moverse a través de ella, en el filtro la fase sólida está soportada por una superficie permeable a través de la cual pasa el líquido.

Las centrifugas sedimentadoras a su vez se dividen en 5 grupos principales, los cuales se diferencian entre sí por la capacidad, eficiencia de separación y capacidad de manejo y clasificación de sólidos. Así existen centrifugas sedimentadoras Tubulares, de canasta, de cámaras, decantadores centrifugos y centrifugas de discos las cuales se subdividen en 4 tipos cuya principal diferencia es la forma de manejo y descarga de sólidos. Estos tipos son: centrifuga de discos de tambor no perforado, de toberas, autodeslodante y de toberas con valvulas.

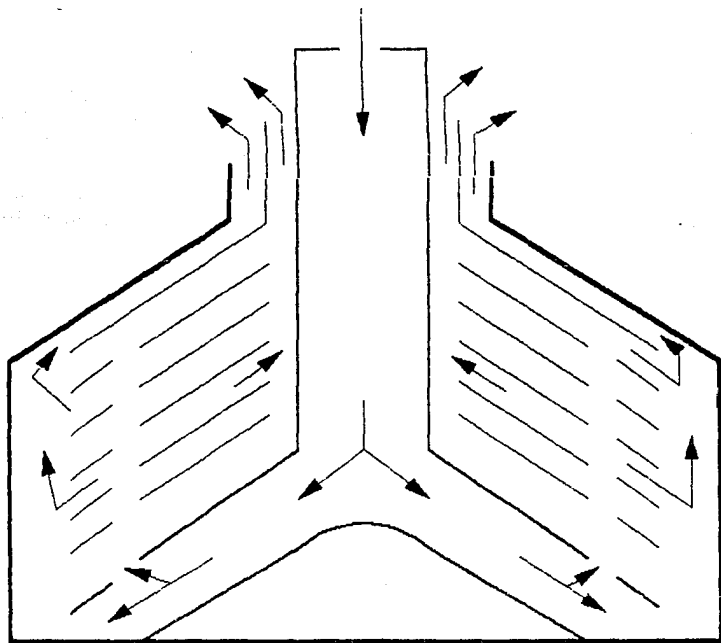
La selección de una centrifuga para un proceso determinado

factores que afectan o tienen que ver de alguna manera con el proceso. Normalmente es imposible elegir una centrífuga sin hacer antes pruebas de laboratorio ó planta piloto para determinar óptimamente la centrífuga adecuada a un proceso.

Una centrífuga es un equipo muy delicado cuya operación debe realizarse siguiendo estrictamente las medidas de seguridad, mantenimiento y operación recomendadas por el fabricante ya que de no observar todas estas precauciones puede darse lugar a un accidente de graves consecuencias.

La realización de una práctica de Centrifugación tiene por objeto familiarizar a los estudiantes con una separación mecánica que tiene una gran variedad de aplicaciones en la industria y que es necesario conocer puesto que difícilmente habrá un ingeniero en planta que no tenga que enfrentar problemas de separación, recuperación de materiales caros, eliminación de agua, clarificación ó concentración de lodos.

PRACTICA DE CENTRIFUGACION PROPUESTA PARA EL LABORATORIO DE
INGENIERIA QUIMICA DE LA FACULTAD DE QUIMICA.



CENTRIFUGACION.

OBJETIVOS.

El alumno:

-Operará un separador centrifugo siguiendo estrictamente las recomendaciones de seguridad.

-Separará diferentes mezclas utilizando para ello los diferentes tambores con los que cuenta el equipo eligiendo el más apropiado en cada caso.

-Establecerá el valor de Σ (sigma) para las centrifugas utilizadas y podrá estimar equipos de mayor capacidad.

FUNDAMENTOS TEORICOS.

Las centrifugas se utilizan comercialmente para:

1. Separar líquidos inmiscibles.
2. Eliminar ó recuperar sólidos de dispersiones en líquidos.
3. Eliminar el exceso de líquido de sólidos.
4. Cualquier combinación de las primeras tres.

Se emplean básicamente dos tipos diferentes de máquinas centrifugas para llevar a cabo estas operaciones. En el primero, el cual puede describirse como una *máquina sedimentadora*, el líquido o alguna de las fases líquidas es continua y las partículas dispersas de la fase sólida o de la otra fase líquida son forzadas a moverse a través de la fase continua debido a la aceleración de la fuerza centrifuga. La relación matemática que

gobierna la velocidad de migración de las partículas fue desarrollada por Stokes como la ley que lleva su nombre.

El segundo tipo básico de centrifuga puede ser descrito como un *Filtro centrifugo*. En él, la fase sólida está soportada en una superficie permeable, tal como una malla, a través de la cual la fase continua tiene el paso libre bajo la aceleración de la fuerza centrífuga. Las relaciones matemáticas para este tipo de centrifuga no han sido estudiadas tan exhaustivamente como las del tipo en el cual la fase líquida es continua. La evaluación del funcionamiento de la centrifuga del tipo *filtro centrifugo* es casi enteramente empírica.

CENTRIFUGAS SEDIMENTADORAS.

Una centrifuga sedimentadora es un tambor no perforado en el cual se alimenta una suspensión y se hace girar a alta velocidad. El líquido es separado continua o intermitentemente, mientras que los sólidos permanecen en el tambor.

Las unidades industriales se distinguen de acuerdo al diseño del tambor y al mecanismo de descarga de los sólidos. La figura 1 muestra los diferentes tipos de centrifugas sedimentadoras y sus características principales.

CENTRIFUGAS SEDIMENTADORAS

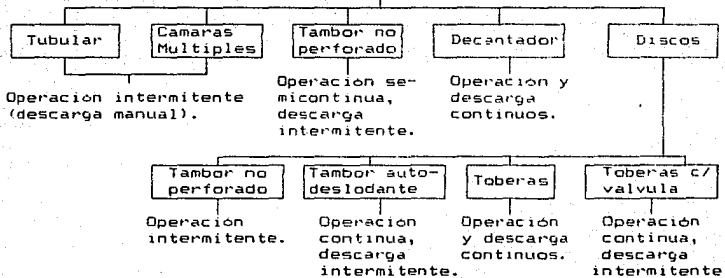


Fig. 1.

TEORIA DE LA SEDIMENTACION CENTRIFUGA.

La fuerza efectiva que actua sobre una partícula es:

$$F = (m - m_1) \omega^2 r^2 \quad (1)$$

Para una esfera:

$$F = \frac{\pi}{6} \Delta \rho D^3 \omega^2 r \quad (2)$$

La fuerza que se opone a la sedimentación por la ley de Stokes es

$$F = 3 \pi \mu D v_s \quad (3)$$

En el equilibrio:

$$v_s = \frac{\Delta \rho D^2 \omega^2 r}{18 \mu} \quad (4)$$

El campo centrífugo difiere del gravitacional únicamente en que puede ser mayor en varios órdenes de magnitud y en que varía en proporción a la distancia desde el centro de rotación, r , de tal forma que la velocidad de sedimentación de una partícula aumenta conforme se aleja del centro de rotación, mientras que en el gravitacional su velocidad es independiente de la posición.

Si consideramos la forma de centrífuga más sencilla, un tambor con tapas, girando y con turbulencia despreciable. v_s es la velocidad con la cual la partícula se aproxima a la pared del tambor. Si se considera al líquido en el tambor como una capa de espesor s , ser alimentado y descargado continuamente, entonces el tiempo t durante el cual el líquido está en el tambor es V/Q , donde V es el volumen de líquido en el tambor a un tiempo determinado y Q es el flujo de líquido a través del tambor. Como hemos supuesto que s es pequeño, la velocidad de sedimentación de una partícula será aproximadamente uniforme y la distancia sedimentada por la partícula será:

$$x = v_s t = \frac{\Delta \rho D^2 \omega^2 r}{18 \mu} \frac{V}{Q} \quad (5)$$

Si x es mayor que la distancia inicial de la partícula desde la pared del tambor, será separada de la fase líquida; de otra forma permanecerá en suspensión y será descargada con el licor efluente. En un sistema ideal, cuando $x = s/2$, la mitad de las partículas de diámetro D serán separadas de la suspensión y la otra mitad no. Esta condición se conoce como el punto de separación y el flujo, Q , en este punto será:

$$Q = \frac{\Delta\rho D^2}{9\mu} \frac{V\omega^2 r}{s} \quad (6)$$

a partir de esta ecuación, se puede calcular el diámetro crítico:

$$D = \sqrt{9\mu Q \frac{s}{V\omega^2 r}} \quad (7)$$

Las partículas mayores que este diámetro serán separadas en su mayoría y la más pequeñas permanecerán en suspensión.

Para centrifugas más complicadas que un simple tubo con una capa muy delgada de líquido, el radio, r , y el espesor de la torta, s , deben ser corregidos y reemplazados por los valores correspondientes de r_0 y s_0 .

Si en una centrifuga tubular la capa de líquido no es delgada, pero se extiende de r_1 a r_2 , entonces puede demostrarse que:

$$\frac{r_0}{s_0} = \frac{1}{\ln \left[\frac{2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right]} \approx \frac{\frac{3}{2} r_2^2 + \frac{1}{2} r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (8)$$

La ecuación (7) puede escribirse como:

$$Q = 2 v_g \Sigma \quad (9)$$

donde:

$$v_g = \frac{\Delta\rho D^2 g}{18\mu} \quad (10)$$

y

$$\Sigma = \frac{V\omega^2 r_0}{g s_0} \quad (11)$$

Se observa que los elementos que se refieren al sistema líquido están todos incluidos en el primer grupo, mientras que el

segundo grupo incluye a los elementos concernientes a la centrifuga. Σ es un indicador del tamaño de la centrifuga, de hecho tiene la dimensión (longitud)² y es el area equivalente de un tanque sedimentador teóricamente capaz de hacer el mismo trabajo de separación efectivo.

Charles M. Ambler (2,3) desarrolló para los diferentes tipos de tambores las ecuaciones correspondientes:

A. Para la centrifuga de tubos o de laboratorio:

$$\Sigma = \frac{\omega^2 v}{4.6 \log \left[\frac{2 r_1^2}{r_1^2 + r_2^2} \right]} \quad (17)$$

B. Para la centrifuga de tambor tubular:

$$\Sigma = \frac{\pi l \omega^2}{g} \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{\ln \left[\frac{2 r_2^2}{r_2^2 + r_1^2} \right]} \quad (18)$$

para la cual se tiene una aproximación:

$$\Sigma = \frac{2 \pi l \omega^2}{g} \left(\frac{3}{4} r_2^2 + \frac{1}{4} r_1^2 \right) \quad (18a)$$

C. Para la centrifuga del tipo de discos:

$$\Sigma = \frac{2 n n_0^2 (r_2^3 - r_1^3)}{3 C g \tan \theta} \quad (19)$$

En todas estas ecuaciones, los cálculos se basan en el comportamiento de una partícula bajo condiciones de sedimentación no impedida y la suposición de que esta partícula está siempre en equilibrio con el campo de fuerza de la centrifuga bajo las condiciones definidas por la ley de Stokes.

COMPARACION DE CENTRIFUGAS.

En la ecuación (14) $Q/\Sigma = 2 v_g$ es constante para un sistema determinado, de esta forma, debería ser posible, en los límites previamente establecidos, comparar varias centrifugas entre sí con sedimentadores gravitacionales en la base de que:

$$\frac{Q_1}{\Sigma_1} = \frac{Q_2}{\Sigma_2} = \frac{Q_3}{\Sigma_3} \dots = 2 v_g \quad (20)$$

Para centrifugas de geometría similar, esta relación ha sido comprobada para bajas concentraciones de partículas de arcilla dispersadas que han sido previamente clasificadas entre los límites del intervalo de distribución de tamaño de partículas.

En este sistema ideal, cuando un valor de C en la ecuación (19) de 1.8 es usado para el valor de sigma de la centrifuga de discos, la relacion aparece como válida entre las centrifugas tubular y de discos con una diferencia en el intervalo del error

experimental.

DESCRIPCION DEL EQUIPO.

El separador centrífugo LWA-205 es una máquina de laboratorio ó planta piloto que tiene una gran variedad de aplicaciones. Este equipo puede ser empleado en la estimación de equipos mayores para un proceso específico ya que como máquina de pruebas puede realizar las funciones de una centrífuga de cámaras, de discos de tambor no perforado y de toberas.

Cuenta con un motor eléctrico de 0.45 kw para 220/380 v de tres fases, capaz de lograr que la centrífuga desarrolle una velocidad de hasta 12 000 rpm.

OPERACION DEL EQUIPO.

1. Armado de los Tambores.

A.- Tambor de Cámaras (figuras 20 y 23).

1.- Insertar el empaque de hule (1) en la ranura de la base del tambor (5).

2.- Colocar el ala interior (2).

3.- Colocar la cámara interior (3) de tal forma que su guía embone con la del ala (2).

4.- Colocar la cubierta del tambor (4) y apretar la tuerca (6) con la llave correspondiente.

5.- Colocar el tambor armado en el eje asegurándose que entre en la ranura de éste.

6.- Ensamblar los siguientes accesorios:

colector de líquidos ligeros (8a),
colector de líquidos pesados (8b),
colector de inundación (8c),
recipiente interior (9) y
recipiente de alimentación (10b).

B.- Tambor de Discos (figuras 21 y 23).

1.- Colocar el empaque (1) en la ranura de la base del tambor (7).

2.- Colocar el distribuidor (2) junto con la hacina de discos en su lugar. Se debe comprobar que el disco inferior (3a) sea el que está en el fondo. Este disco tiene espaciadores en ambos lados.

3.- Coloque el disco separador (4).

4.- Coloque la cubierta del tambor (5) y apriete la tuerca (6) con la llave correspondiente.

5.- Colocar el tambor completo sobre el eje asegurándose que la guía entre en la ranura del eje.

6.- Armar el equipo con los accesorios siguientes:

receptor de líquidos ligeros (9a),
receptor de líquidos pesados (9b),
colector de inundación (9c),
recipiente interior (9d) y
recipiente de alimentación (10b).

C.- Tambor de Toberas (figuras 23 y 25).

1.- Colocar el receptor de lodos (10) en la canasta de la centrifuga.

2.- Colocar el empaque (2) en la ranura de la base del

tambor (1).

3.- Colocar el distribuidor con los discos en la base del tambor, asegurándose que el disco inferior esté en el fondo. Este disco tiene espaciadores en ambos lados.

4.- Colocar el disco superior (4c). Este disco no tiene separadores en la cara superior.

5.- Colocar la cubierta del tambor (5) y apretar la tuerca (6) con la llave correspondiente.

6.- Colocar el tambor completo en el eje asegurándose que la guía del tambor entre en la ranura del eje.

7.- Armar el equipo con los siguientes accesorios.

Colector de líquido clarificado (12),

recipiente interior (14) y

recipiente de alimentación (15).

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

El instructor puede elegir si prefiere realizar una prueba con cada tambor ó varias pruebas en el mismo tambor, variando las condiciones del proceso (concentración ó flujo de la alimentación).

Material:

- Probetas graduadas de 2 000 ml. (3).
- Probeta graduada de 1 000 ml. (1).
- Cubetas de plástico. (3).
- Densímetro (0.8 - 2.0 den. rel.) (1).
- Vasos de precipitados de 250 ml. (3).
- Vaso de precipitados de 500 ml. (2).
- Agitador de vidrio. (1).

- Balanza granataria con pesas de 1 000 y 500 g.
- Espátula. (1).
- Cronómetro. (1).
- Vernier. (1).

Sustancias:

- Carbonato de calcio.
- PVC.
- 2-etil-hexanol.
- almidón.
- agua.

Procedimiento:

1) Preparar suspensiones del sistema a estudiar en tres concentraciones diferentes.

2) Vaciar una de las suspensiones en el recipiente de alimentación de la centrifuga.

3) Llenar el tambor de la centrifuga con agua.

4) Conectar la centrifuga y esperar a que alcance su velocidad máxima.

5) Abrir la válvula de alimentación y tomar el tiempo cuando empiece a caer el líquido.

6) El efluente de la centrifuga debe recogerse en las cubetas.

7) Cuando la alimentación ha cesado, se mide el tiempo, el volumen de líquido recolectado y se desconecta el equipo.

8) Desarmar el tambor y limpiarlo.

9) Repetir el experimento con alguna de las otras concentraciones ó variando la apertura de la válvula de

alimentación.

10) Repetir los pasos 1-9 para las diferentes mezclas.

TRABAJO POSTERIOR A LA PRACTICA.

1. Establecer los valores de Σ (sigma) para los diferentes tambores.

2. Calcular el diámetro de partícula en el punto de corte.

3. Calcular con que flujo se podrían separar partículas de $1 \mu\text{m}$ de diámetro.

4. Calcular la eficiencia de separación de cada corrida.

5. Hacer una curva de eficiencia vs flujo.

6. Utilizando las fórmulas de la sección teoría y los datos obtenidos en la práctica, hacer las siguientes gráficas:

a) Tamaño de partícula separada vs flujo.

b) Tamaño de partícula separada vs diferencia de densidades.

c) Tamaño de partícula separada vs rpm del tambor.

7. Estimar una centrifuga capaz de manejar 15 veces el flujo para obtener la misma eficiencia de separación. Tanto de cámaras como de discos.

HOJA DE DATOS.

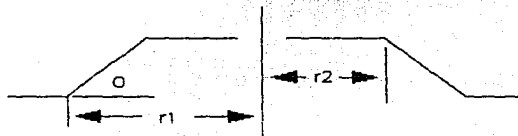
1. Tambor utilizado.

CORRIDA	1	2	3	4	5
FLUJO					
DENSIDADES FASE CONT. FASE DISC.					
CONC. INIC.					
CONC. FINAL					
EFICIENCIA					

NUMERO DE DISCOS EN EL TAMBOR (n):

RADIO DEL TAMBOR.

DIMENSIONES DE LOS DISCOS: r1 _____, r2 _____, 0 _____.



Cuestionario:

- 1.- ¿En qué está basada la centrifugación?
- 2.- ¿Cuántos tipos de centrifugas existen y en qué se diferencian?
- 3.- ¿Cómo operan las centrifugas:
 - a) Tubular,
 - b) de discos,
 - c) decantador centrífugo?
- 4.- ¿Qué es y cómo se calcula el valor Σ (sigma)?
- 5.- ¿Cuáles son las principales aplicaciones de las centrifugas?
- 6.- ¿Qué ventajas presentan las centrifugas respecto a otros métodos para clarificación y separación líquido-líquido?

NOMENCLATURA.

A	area
A	exponente
a	aceleración
B	exponente
C	constante de eficiencia
c	fuerza centrífuga
D	diámetro
D _p	diámetro de una partícula
E	energía
F	fuerza
f	pie
g	aceleración gravitacional.
I	momento de inercia
m	masa
m _l	masa de líquido desplazada por partículas
N _c	número centrífugo
P	presión
Q	flujo
r	radio
r ₁	radio de la superficie del líquido
r ₂	radio a la pared del tambor o medio filtrante
r _i	radio de la interface líquido-líquido
FCR	Fuerza centrífuga relativa
R _m	resistencia del medio filtrante
S	volumen del líquido/volumen del sólido
t	tiempo

V	volumen
v	velocidad
v _g	velocidad en el campo gravitacional
v _s	velocidad en el régimen de Stokes
x	distancia entre discos adyacentes
Z, z	longitud paralela al eje de rotación

Letras griegas

α	resistencia específica de la torta
Γ_c	esfuerzo debido al contenido del tambor
Γ_s	esfuerzo propio del tambor
Γ_t	esfuerzo total
$\Delta\rho$	diferencia de densidad entre fases
δ	espesor de la pared del tambor
ϵ	porosidad de la torta
θ	ángulo de inclinación de los discos
λ	relación altura/diámetro de un tambor
μ	viscosidad absoluta
ξ	fuerza centrífuga relativa
ρ	densidad
ρ_L	densidad de la fase líquida
ρ_m	densidad del material de construcción
ρ_s	densidad de la fase sólida
Σ	Área de sedimentación equivalente
ω	velocidad angular.

Bibliografía.

Artículos:

- 1.- Ambler, C. M., 'New Development in Centrifugal Applications'. *Chem. Eng. Progr.*, 44, 405 (1948). p 97.
- 2.- Ambler, C. M., 'The Evaluation of Centrifuge Performance'. *Chem. Eng. Progr.* 48, 3 (1952). p 150-8.
- 3.- Ambler, C. M., 'Centrifugation Theory'. *Ind. Eng. Chem.*, 53, 6 (1961). p 430-33.
- 4.- Day, R. W., 'Techniques for Selecting Centrifuges'. *Chem. Eng. Mayo* 13 (1974). p 98-104.
- 5.- Flood, J. E. & Porter, H. F., 'Centrifugation Equipment'. *Chem. Eng. Junio* 13 (1966). p 190-7.
- 6.- Maloney, J. G., 'Centrifugation'. *Ind. Eng. Chem.* 48, 3 (1956). p 482-5.
- 7.- Moyers, C. G., 'How to Approach a Centrifugation Problem'. *Chem. Eng. Mayo* 13, (1966). p 182-9.
- 8.- Smith, J. C., 'Selection of Centrifuges for Chemical Processing'. *Ind. Eng. Chem.* 39, 4. p 474-79.
- 9.- Smith, J. C., 'Applications'. *Ind. Eng. Chem.* 53, 6 (1961). p 439-44.
- 10.- Svarovsky, L. 'Sedimentation, Centrifugation & Flotation'. *Chem. Eng.* 86, 15, (1979). p 93-105.
- 11.- West, J., 'Disc Bowl Centrifuges'. *Chem. Eng.* 92, 1 (1985). p 69-73.
- 12.- Willus, C. A. & Fitch, B., 'Flow Patterns in a Disc Centrifuge'. *Chem. Eng. Prog.* 69, 9, (1973). p 73-4.

Libros:

- 13.- Considine, 'Chemical & Process Technology Encyclopedia'
McGraw-Hill, U.S.A. 1974. p 240.
- 14.- Cremer, 'Chemical Engineering Practice'.
Butterworths Scientific Publications, London, 1958.
p-528-66.
- 15.- Foust A. S. & Wenzel L. A. 'Principios de Operaciones
Unitarias'. Cia Editorial Continental, México, 1982.
p 576-84.
- 16.- Geankoplis C. J. 'Procesos de Transporte y Operaciones
Unitarias'. Cia Editorial Continental, México 1982.
p 675-83.
- 17.- Kirk-Othmer, 'Encyclopedia of Chemical Technology'.
John Wiley & Sons. Vol 5, U.S.A. 1979. p 195-233.
- 18.- McCabe & Smith, 'Unit Operations of Chemical Engineering
McGraw-Hill, México 1965. pp 394-411.
- 19.- McKetta, 'Encyclopedia of Chemical Processing and design
Vol. 7, Marcel Dekker, New York 1978. pp 96-153.
- 20.- Perry & Green, 'Chemical Engineers' Handbook'
6th Ed. McGraw-Hill, USA 1984. pp 19-89 - 19-103.
- 21.- Riegel, E.R. 'Chemical Process Machinery'.
2nd Ed. Reinhold Publishing Co. USA 1953. pp 367-89.
- 22.- Schweitzer, P.A. 'Handbook of Separations Techniques for
Chemical Engineers'. McGraw-Hill USA 1979. pp 4-55-4-84.

Otros:

- 23.- Hemfort, H. 'SEPARATORS'.
Technical Scientific Documentation No. 1.
Westfalia Separator AG, Oelde West Germany 1984.
- 24.- Hemfort, H. & Kohlstette, W., 'ZENTRIFUGAL SEPARATOREN
UND DEKANTER FUR DIE BIOTECHNOLOGIE'.
Technische-wissenschaftliche Dokumentation Nr. 5.
Westfalia Separator AG, Oelde BDR 1988.
- 25.- Lehmann, H.R. & Zettler, K.H., 'CENTRIFUGAS DESNATADORAS
PARA LA INDUSTRIA LACTEA'.
Documento Técnico-científico Nq. 7.
Westfalia Separator AG, Oelde, RFA 1987.
- 26.- Lehmann, H.R. & Delle, E., 'CENTRIFUGAS SEPARADORAS PARA
HIGIENIZACION Y DESBACTERIZACION DE LA LECHE'.
Documento Técnico Científico No. 12.
Westfalia Separator AG. Oelde, RFA 1987.
- 27.- Westfalia Separator AG. 'CENTRIFUGAS CON TAMBOR
AUTODESLODANTE PARA LA INDUSTRIA QUIMICA Y ALIMENTICIA'.
Boletín 6828/1278, Oelde, RFA.
- 28.- Westfalia Separator AG. 'NOZZLE CENTRIFUGES FOR CHEMICAL
AND FOOD PROCESSING'.
Bulletin 9997-7084-010/1083, Oelde, West Germany.
- 29.- Westfalia Separators AG. 'DECANTERS FOR CHEMICAL, FOOD
AND INDUSTRIAL PROCESSING'.
Bulletin 9997-6440-000/0583, Oelde West Germany.
- 30.- Westfalia Separator AG. 'MASCHINEN FUR MECHANISCHE
TRENNTÉCHNIK'.
Zettel 99975291000/0882. Oelde BRD.

- 31.- Dorr-Oliver Inc. 'THE MERC0 CENTRIFUGE'.
Bulletin 2612, USA 1982.
- 32.- Dorr-Oliver Inc. 'THE MERC0 PRESSURE CENTRIFUGE'.
Bulletin 2600, USA 1978.
- 33.- Dorr-Oliver Inc., 'CONTINUOUS SEPARATION FOR THE FOOD
PROCESSOR'. Bulletin B-2755 USA 1980.
- 34.- Dorr-Oliver Inc., 'THE MERC0 CSU'.
Bulletin B-2620, USA 1976.
- 35.- Dorr-Oliver Inc., 'PILOT PLANT CENTRIFUGE'.
Bulletin B-262, USA 1980.
- 36.- Dorr-Oliver Inc., 'THE MERC0 BOWL CENTRIFUGE'.
Bulletin B-MB-2, USA 1984.
- 37.- Dorr-Oliver Inc., 'THE MERCONE'.
Bulletin MN2, USA 1982.
- 38.- Alfa-Laval., 'DAIRY CENTRIFUGES'.
Bulletin FB 62088E2 8211, Sweden.
- 39.- Alfa-Laval., 'SELF CLEANING CLARIFIER MRPX 207 SGV'.
Bulletin PD 60049E2, Sweden.
- 40.- Alfa-Laval., 'SELF CLEANING CLARIFIER MRPX 413 SGV'.
Bulletin PD 60050E2, Sweden.
- 41.- Alfa-Laval., 'HERMETIC MILK CLARIFIER S 2183 M'.
Bulletin PD 60052E2, Sweden.
- 42.- Alfa-Laval., 'SELF-CLEANING MILK CLARIFIER MRPX 409'.
Bulletin PD 60041E, Sweden.