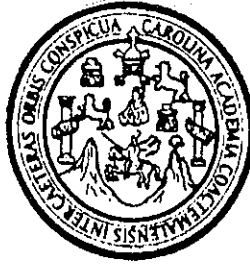


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO DE VACÍO (PAN - FILTER) Y SU
APLICACIÓN EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO POR EL
"WET PROCESS"

TESIS PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ERICK OBDULIO AGUILAR TOC

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA OCTUBRE DE 1997

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

01
T0123
11

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO DE VACÍO (PAN-FILTER) Y SU APLICACIÓN EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO POR EL "WET PROCESS"

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 16 de abril de 1,996.

ERICK OBDULIO AGUILAR TOC.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1°	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL 2°	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3°	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4°	Br. Victor Rafael Lobos Aldana
VOCAL 5°	Br. Wagner Gustavo López Cáceres
SECRETARIA	Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Julio Enrique Chávez Montúfar
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Walter Zelada
SECRETARIO	Ing. Francisco González López

Guatemala 4 de Julio de 1997

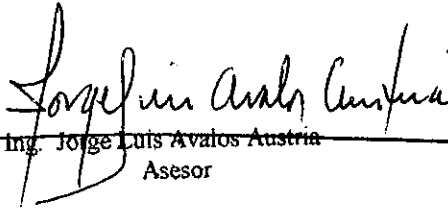
Ingeniero
Julio Chavez
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Respetable Ingeniero:

Por medio de la presente hago constar que he revisado la Tesis de graduación de Erick Obdulio Aguilar Toc, denominada " DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO DE VACIO (PAN - FILTER) , Y SU APLICACION EN EL PROCESO DE FABRICACION DE ACIDO FOSFORICO POR EL WET PROCESS ".

Considero que el trabajo ha sido elaborado adecuadamente, por lo que considero procedente que pase a revisión final previo a su aprobación como tesis de graduación.

Atentamente



Ing. Jorge Luis Avalos Austria
Asesor

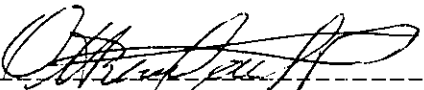
Guatemala, 1 de Agosto de 1997.

ING. JULIO E. CHAVEZ M.
DIRECTOR DE ESCUELA DE ING. QUIMICA.
FACULTAD DE INGENIERIA. U.S.A.C.

Estimado Sr. Director, después de saludarlo deseo hacer de su conocimiento que he procedido a revisar el Informe Final de Tesis del Sr. ERICK ABDULIO AGUILAR TOC. de título: " DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO DE VACIO (PAN-FILTER) Y SU APLICACION EN EL PROCESO DE PRODUCCION DE ACIDO FOSFORICO POR EL WET-PROCESS".

Una vez revisado este trabajo, lo he encontrado satisfactorio para su aprobación. Por tanto le pido que se proceda con los trámites subsiguientes al efecto.

Muy Atentamente:



Ing. Otto Raul de León de Paz.
Revisor del Informe Final de Tesis.



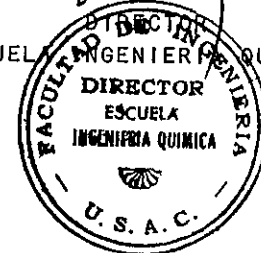
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Julio Chávez Montúfar, después de conocer el dictamen del asesor con en el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante Erick Obdulio Aguilar Toc, titulado: DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO DE VACIO (PAN-FILTER) Y SU APLICACION EN EL PROCESO DE FABRICACION DE ACIDO FOSFORICO POR EL "WET PROCESS", procede a la autorización del mismo.

Ing. Julio Chávez Montúfar
DIRECTOR
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 6 de octubre de 1,997.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de tesis titulado: **DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO DE VACIO (PAN-FILTER) Y SU APLICACION EN EL PROCESO DE FABRICACION DE ACIDO FOSFORICO POR EL "WET PROCESS"**, del estudiante **Erick Obdulio Aguilar Toc**, procede a la autorización para la Impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, 6 de octubre de 1,997

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

Teodoro Aguilar Sum
Emiliana Toc de Aguilar.

A MIS HERMANOS

Sonia Yolanda, Enrique Otoniel, Miriam Odilia,
Lilian Carol, Nery Aroldo.

A MI FAMILIA

Alicia Eugenia, Carlos, Francisco, René.

A MIS AMIGOS

Carol Valdez (Q.E.P.D), Hans Marroquin, Alfonso Tock,
Nestor Salazar, Sergio Recinos, Luis Roma.

EN ESPECIAL A

Surama Eugenia Morales.

INDICE

	Página
Indice de figuras	i
Glosario	iii
Sumario	1
Introduccion	2
Antecedentes	4
1.- Teoría de filtración	5
2.- Filtración al vacío	8
2.3 Ecuaciones básicas de la filtración al vacío	11
3.- Sistemas de vacío	18
4.- Válvula automática distribuidora de vacío	29
5.- Pruebas a pequeña escala para el diseño de filtros de vacío	33
6.- Filtros horizontales rotatorios de vacío (pan- filter)	39
7.- Diseño del filtro horizontal rotatorio de vacío	48
Conclusiones	65
Recomendaciones	66
Referencias bibliograficas	67
Anexo	69

Figura 7.2	Diagrama del proceso total de fabricación de ácido fosfórico	52
Figura 7.3	Balance de materiales en la sección de reactores	54
Figura 7.4	Balance general del proceso de filtración	56
Figura 7.5	Correlación entre $\ln \Delta P$ vrs. $\ln \alpha$	59
Figura 7.6	Diametro del filtro	60
Figura 7.7	Diagrama del tornillo transportador	62

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades de las fibras	16
Tabla 2	Requisitos mecánicos de medios filtrantes	17
Tabla 3	Intervalos de operación de bombas de vacío	28
Tabla 4	Guía para la selección del equipo de filtración adecuado	35
Tabla 5	Procesos en donde se utilizan los filtros horizontales de vacío	46
Tabla 6	Correlación de datos	58
Tabla 7	Correlación de datos	58
Tabla 8	Correlación de datos	69
Tabla 9	Correlación de datos	70
Tabla 10	Correlación de datos	70
Tabla 11	Correlación de datos	71

GLOSARIO

Batch	Tipo de proceso que es realizado por lotes; éste tiene un tiempo finito de realización.
Blow-back	Corriente de aire a presión que es insuflada a la tela filtrante para remover la torta residual que no puede ser removida por el tornillo transportador.
Bomba de vacío	Equipo de procesos que es utilizado para la generación de vacío con una disminución de la presión por debajo de la atmósfera.
Coefficiente de compresibilidad	parámetro obtenido por experimentación que indica si una torta es compresible o incompresible; su valor está entre 0 - 1.
Embudo Buchner	Equipo de laboratorio utilizado para la realización de pruebas a escala para predecir el comportamiento de los filtros horizontales rotatorios de vacío
Eyector	Dispositivo productor de vacío que utiliza una corriente de aire o vapor para su funcionamiento.
Lechada	Mezcla sólido - líquido.
Lixiviación	Tratamiento para separar por medio de un disolvente, la parte líquida de una mezcla sólido-líquido.
Medio de filtración	Tela o malla que se utiliza para para la separación de las fases sólido - líquido en el proceso de filtración.
Piñón	Rueda dentada del engranaje de una máquina.
Presión	Fuerza aplicada sobre una superficie por unidad de su área.

Purga	Residuos obtenidos de los procesos de las operaciones industriales.
Septo	Superficie de un filtro de vacío sobre la que se coloca el medio filtrante.
Soluto	Fase líquida de la lechada de filtración.
Suspensión	Mezcla sólido- líquido, en la que las partículas sólidas están distribuidas en todo el líquido.
Torta	Pasta húmeda que se obtiene al final del proceso e filtración.
Válvula automática	Accesorio de un filtro de vacío, cuya función es la de separar el licor obtenido en el proceso de filtración de los lavados realizados. También es el encargado de distribuir la corriente de vacío a cada uno de los compartimientos de recolección del equipo de filtración.

SUMARIO:

El presente trabajo expone el diseño de un filtro horizontal continuo rotatorio de vacío (Pan - Filter) aplicado al proceso de fabricación de ácido fosfórico.

En él se presentan los principios básicos de la teoría de filtración a presión constante, principalmente la filtración al vacío; también se tratan los sistemas de vacío y se detalla el funcionamiento de la "válvula automática"; ambos, muy importantes en el diseño de los equipos de filtración al vacío. Se presentan los aspectos básicos para la realización de pruebas experimentales y el papel clave que juegan en el diseño de los equipos de filtración.

Luego se exponen detalladamente los filtros horizontales rotatorios de vacío, sus aplicaciones, función y aspectos teóricos, para luego pasar al diseño del filtro.

El material que se va a filtrar es una suspensión de yeso - ácido fosfórico al 31 % obtenidos por el proceso húmedo o "wet process"; el filtro debe trabajar a una presión de vacío de 15" Hg, la temperatura de la suspensión que ingresa al filtro es de 65 - 70 ° c y el mismo debe obtener como licor principal de filtrado (producto terminado) 5.483 Tm / hr de ácido fosfórico al 31 %.

También se diseña el tornillo transportador, que es el encargado de retirar la torta filtrada del equipo, también se diseña la válvula automática. El diseño no incluye el sistema de vacío, el proceso de fabricación del ácido fosfórico y el sistema de bombeo.

INTRODUCCIÓN

La filtración se define como la separación de sólidos de un líquido, por medio de pasar una suspensión a través de un medio permeable, el cual retenga las partículas. En orden de obtener un flujo a través del medio filtrante, una caída de presión debe ser aplicada a través del medio, la cual puede ser por: gravedad, vacío, centrifugación y presión. En la filtración al vacío el líquido es succionado a través de un medio filtrante sobre el que se deposita una torta de sólidos. La torta se aleja de la zona de filtración, se lava, se seca por aspiración y se descarga del medio filtrante para reiniciar el ciclo de entrada de la suspensión. En todo momento, una parte del medio filtrante se encuentra en la zona de filtración, otra parte en la zona de lavado y otra en la etapa de descarga, de forma que la salida del líquido y de los sólidos se realiza ininterrumpidamente.

La selección de un equipo de filtración depende fundamentalmente de el tamaño de partícula, la concentración de sólidos en la suspensión, la resistencia de los sólidos a la filtración y el subsecuente proceso del filtrado o de la torta.

Los filtros de vacío más utilizados en la industria son los de discos, de tambor y los horizontales. Los filtros horizontales de vacío se utilizan generalmente en la filtración de sólidos pesados y densos; la característica fundamental de estos filtros es su capacidad de extraer todo el solvente o licor principal utilizando para ello agua de lavado a contracorriente, además se puede determinar arbitrariamente el espesor de la torta a filtrar.

El filtro horizontal rotatorio de vacío que aquí se diseña, se utilizará para la filtración de la suspensión yeso - ácido fosfórico, provenientes del proceso húmedo o "wet process" de fabricación de ácido fosfórico.

Con el presente trabajo se pretende incentivar a las empresas a que utilicen la capacidad del ingeniero químico para el diseño y montaje de equipo, así como la implementación de un departamento de investigación y desarrollo para aumentar el crecimiento de la industria química en el país.

La fabricación de productos químicos en nuestro país es muy limitada, debido a que generalmente el equipo que se necesita es demasiado caro en el extranjero por lo que muchas empresas abandonan la idea de dedicarse a la fabricación de los productos y optan por importarlos y distribuirlos; esto contribuye a que

nuestro país no se desarrolle y nos hace depender siempre de los países industrializados. Sin embargo, la implementación de un departamento de investigación y desarrollo puede ser muy importante para que estas empresas tengan la posibilidad de diseñar sus equipos e implementar muchos procesos de fabricación de productos químicos, evitando con ello depender de la industria extranjera y promoviendo el desarrollo del país.

ANTECEDENTES

El primer filtro horizontal rotatorio fue desarrollado en 1920, el cual fue utilizado con el objetivo de remover productos arenosos y granulares provenientes de la industria minera.

En 1952 se desarrolló y patentó el filtro horizontal rotatorio de vacío principalmente para la separación de suspensiones yeso - ácido fosfórico provenientes de la fabricación de ácido fosfórico por el llamado proceso húmedo o "wet process". Este filtro mejoró en varios aspectos al primer filtro horizontal rotatorio, principalmente en la aplicación de una corriente de aire para insuflar la torta no retirada del filtro por el mecanismo de descarga, mejorando con ello la eficiencia del mismo; por otra parte la eficiencia de lavado es mucho mayor comparada con la de un filtro de tambor rotatorio; por otra parte se recomendó para la separación de sólidos densos y pesados con tamaño de partícula no muy fino.

Aparte de las patentes de invención consultadas no hay trabajos que los traten en forma detallada; la mayor parte de las referencias los mencionan en forma muy general, por lo que los aspectos más importantes se tomaron en cuenta para el desarrollo del presente trabajo. A nivel local, actualmente no hay trabajos que hayan tratado el tema del diseño de un filtro horizontal rotatorio de vacío en forma particular; de hecho hay muy pocos trabajos relacionados al tema de filtración.

En el presente trabajo el diseño del filtro horizontal rotatorio de vacío (pan - filter) está basado sobre las ecuaciones de la teoría de filtración, de pruebas experimentales, así como de patentes de invención e información obtenida con empresas fabricantes.

1 TEORÍA DE FILTRACIÓN

1.1 Principios teóricos:

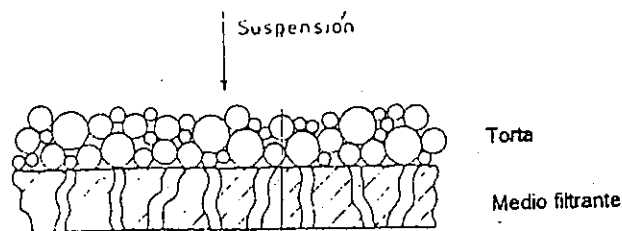
La filtración consiste en la separación de partículas sólidas de un fluido. El fluido puede ser un líquido o un gas. [4] Casi siempre, la filtración da como resultado la formación de una capa o torta de partículas sólidas en la superficie del cuerpo poroso, que es con frecuencia una tela que forma el medio de filtración. Una vez que se forma esta capa, su superficie actúa como medio de filtrante, de modo que los sólidos se depositan y se agregan al espesor de la torta, mientras que el fluido claro pasa por ella. Por consiguiente, la torta se compone de una masa a granel de partículas de formas irregulares, por entre las cuales corren canales pequeños y el flujo de fluido pasa a través de estos canales. (1)

1.2 Tipos de filtración:

Fundamentalmente hay dos tipos de filtración utilizadas en la práctica: la llamada "filtración de superficie", en la cual los sólidos son depositados en forma de pasta sobre la parte superior de un medio filtrante relativamente delgado; mientras que la llamada "filtración de profundidad" es utilizada en la clarificación de líquidos o gases en la que, la deposición de partículas toma lugar dentro del medio filtrante.

Como puede observarse en la figura 1.1, las partículas del mismo tamaño o más grandes que las aberturas, se acúan entre ellas y crean pequeños pasajes, los cuales remueven hasta las más pequeñas partículas del fluido.

Figura 1.1



Mecanismo de la filtración de torta.

Una pasta filtrante es así formada, la cual en su momento funciona como medio para la filtración de la subsiguiente suspensión que ingresa al filtro. Para evitar el bloqueo del medio filtrante, algunas veces se utiliza una ayuda filtrante como precapa, la cual forma un lecho inicial en el medio. El fluido circula a través del medio filtrante en virtud de una diferencia de presión a través del medio.

Los filtros de superficie, son generalmente utilizados para suspensiones con una gran concentración de sólidos (arriba de 1 % por volumen), debido al bloqueo que ocurre en el medio filtrante cuando se utiliza para la filtración de suspensiones diluidas. En la filtración de profundidad, las partículas son mucho más pequeñas que las aberturas del medio filtrante; y aquí, ellas avanzan hacia adentro de los poros en donde son colectados por varios mecanismos (gravedad, difusión e inercia) [2]

Los filtros de profundidad son utilizados generalmente, para clarificación y para la separación de partículas finas de suspensiones diluidas (líquidos o gases); una de sus aplicaciones más importantes es la clarificación de bebidas (menos de 0.1 % de concentración en volumen).

De los dos tipos de filtración, la filtración de superficie tiene una amplia aplicación particularmente en la industria química (debido a las altas concentraciones utilizadas). Similarmente a otros equipos de separación, la característica principal de los filtros es la relación flujo - caída de presión y otras características de funcionamiento tales como la eficiencia de separación. Sin embargo, en filtración estas relaciones son más complejas debido a otros factores (pej. espesor de la pasta, masa de pasta por unidad de área, resistencia específica de la torta, etc) los cuales, tienen gran influencia en el proceso. [2]

Los filtros para limpieza de gases comprenden filtros de barras para polvo atmosférico, lechos granulares y filtros de bolsas para el tratamiento de polvos. El aire se limpia haciéndolo pasar a través de masas de pulpa de celulosa, algodón, fibra de vidrio o tamices metálicos. En ocasiones, el medio filtrante se desecha pero en la limpieza de gases a gran escala con frecuencia se lavan. [4]

1.3 Clasificación de los filtros de superficie:

Los filtros de superficie se utilizan casi siempre para separaciones sólido - líquido. Existen diversos métodos para clasificar a los equipos de filtración y no es posible establecer un sistema simple que incluya todos los tipos. La forma más general y aceptada los clasifica en:

1.3.1 Filtros de gravedad

En un filtro por gravedad, el flujo del filtrado se produce debido a la presión hidrostática de la columna de material para filtrar que permanece por encima de la superficie de la torta o el medio de filtro. Esta presión generalmente es baja y va de un máximo de unos cuantos centímetros de fluido, en un embudo de laboratorio, a un máximo de unos cuantos pies de fluido, en un filtro de planta. [1]

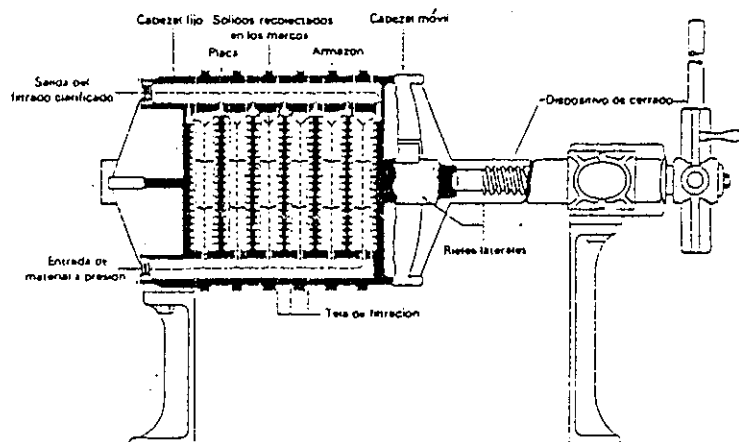
1.3.2 Filtros de presión

Estos utilizan una gran presión diferencial a través del medio filtrante para lograr económicamente una filtración rápida con sólidos viscosos o con sólidos finos. Los más utilizados son los " filtro prensa " de marco y placas. Este tipo de filtro funciona a una presión superior a la atmosférica en la superficie de filtración e igual a la atmosférica o mayor que ella, en el lado corriente abajo del septo. Generalmente, la presión se impone mediante una bomba de líquido o gas comprimido.[4]

1.3.3 Filtros de vacío

En este tipo de filtros, el líquido es succionado a través de un medio filtrante sobre el que se deposita una torta de sólidos. Estos pueden ser continuos o discontinuos.

Figura 1.2
Filtro prensa



2: FILTRACIÓN AL VACÍO

2.1 Características:

La filtración al vacío es dentro de la industria química, el tipo de filtración más utilizada debido a sus grandes ventajas y primordialmente al hecho de que se utiliza principalmente en sistemas continuos. Los filtros al vacío funcionan a una presión menor que la atmosférica en el lado corriente abajo del septo del filtro. Por lo común, la presión corriente arriba es esencialmente la atmosférica; por consiguiente, **los filtros al vacío se limitan a una presión máxima de filtración de 1 atmósfera**. Puesto que la lechada de prefiltración se alimenta a la presión atmosférica, puede llegar al tanque del filtro por gravedad o utilizando una bomba de carga baja. La bomba de vacío es un accesorio muy importante para los filtros de vacío, puesto que es la fuente de la fuerza impulsora de filtración y, en muchas instalaciones, el dispositivo de mayor costo operacional. Por lo común, se escogen bombas secas al vacío en lugar de las de vía húmeda. La elección es más bien de índole económico y depende de los detalles de servicio. En algunos casos, un brazo barométrico que se descarga en un sello de sumidero elimina la necesidad de una bomba al vacío. [1]

Todas las técnicas de filtración empleadas son similares a todos los otros métodos de filtración de superficie, en donde el medio filtrante poroso soporta el depósito del filtro; sin embargo, a diferencia de otras formas de filtración, la filtración al vacío emplea una baja fuerza de impulso y esto es lo que permite que sea utilizada en un área especial de aplicación. [2]

Obviamente, existen ventajas y desventajas para tales sistemas. La principal desventaja resulta de la limitación obvia en la presión utilizada, la cual puede dar bajas tasas de filtración y pastas bastante húmedas; sin embargo también existen algunas ventajas muy sustanciales. Los problemas encontrados en el diseño de filtros de vacío tanto batch, como continuos, tienden a ser menos difíciles de superar que para los filtros que operan a altas presiones o a muy altas velocidades de rotación; por ejemplo, los separadores centrífugos. [2]

Tal vez la más significativa ventaja proporcionada por el sistema de vacío es la operación continua bajo relativamente simples condiciones mecánicas, y aunque existe un rango para la filtración de vacío en "batch" disponible corrientemente, la mayoría de las aplicaciones de la filtración al vacío es en proceso continuo; de hecho, la principal justificación de la filtración al vacío es su adaptabilidad a los sistemas continuos. Los equipos de filtración continua al vacío especialmente aquellos de tipo rotatorio han demostrado ser capaces de operar mucho más satisfactoriamente en muchos campos de aplicación que cualquier otro tipo de filtro continuo. [2]

Ventajas de los filtros de vacío

- 1.- Se pueden diseñar como filtros continuos eficaces.
- 2.- Utilizan poca mano de obra y son adiciones eficientes para los procesos continuos.
- 3.- La superficie de filtración se puede abrir a la atmósfera y, por consiguiente, es fácil llegar a ella para efectuar inspecciones y reparaciones.
- 4.- Por lo común, los costos de mantenimiento son reducidos.

Desventajas de los filtros de vacío

- 1.- Se debe mantener un sistema de vacío.
- 2.- No se pueden utilizar filtros de vacío con filtrados volátiles, debido a un punto normal de ebullición bajo o a una temperatura de operación elevada.
- 3.- La mayoría de los filtros al vacío no pueden manejar sólidos compresibles cuya filtración es difícil.
- 4.- Los filtros continuos al vacío son inflexibles y no ofrecen un buen desempeño si su corriente de alimentación cambia con respecto a la velocidad, la consistencia o el carácter de los sólidos.

El tonelaje de sólidos que manejan los filtros de vacío es mayor que el que manejan todos los demás tipos de filtros combinados. [1]

2.2 Clasificación de los filtros continuos de vacío :

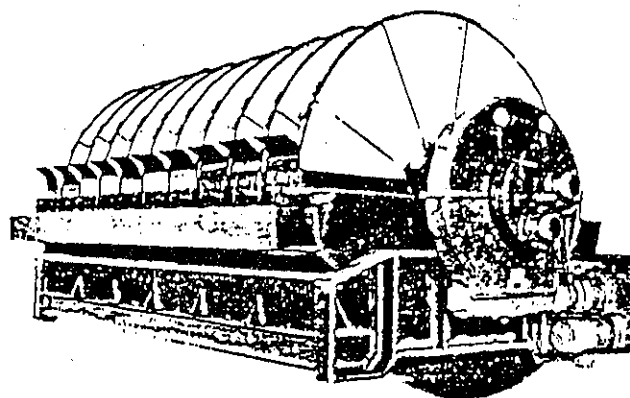
Los filtros continuos de vacío, muy utilizados en las industrias de procesamiento, se clasifican en tres categorías: de tambor, de disco y horizontales. Los últimos se representan por medio de los tipos de mesa, bandeja y banda. Aún cuando existen diferencias sorprendentes entre los diseños y las aplicaciones de los filtros continuos al vacío que se utilizan en la actualidad a nivel comercial, todos tienen las mismas características en común: una superficie de filtración que se desplaza de un punto de aplicación de la suspensión, en donde se deposita la torta bajo el impulso de un vacío, a un punto de separación de sólidos donde la torta es descargada por medios mecánicos y neumáticos y de allí, de regreso al punto de aplicación de la lechada; una válvula automática (o un equivalente) que regula la presión por debajo de la superficie en varias etapas de su recorrido; un ciclo aparentemente continuo de funcionamiento que, de hecho, es una serie sin fin de eventos estrechamente espaciados por lotes que se aproximan a un patrón continuo.

De los tres tipos de filtros continuos de vacío que actualmente existen en la industria los más ampliamente

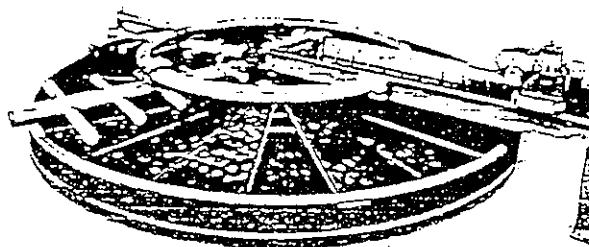
utilizados son los **filtros de tambor rotatorio**, los **filtros de discos rotatorios** y los **filtros horizontales**, tanto rotatorios como los de banda.

Figura 2.1

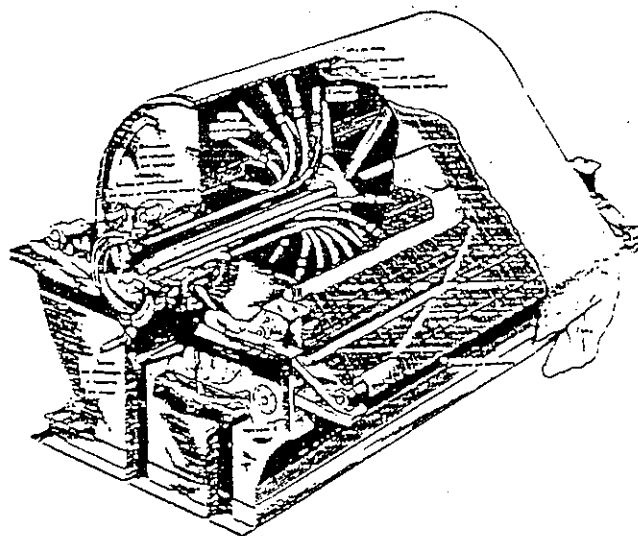
Filtros continuos de vacío más utilizados en la industria.



Filtro de discos



Filtro horizontal rotatorio



Filtro de tambor

2.3 Ecuaciones básicas de la filtración al vacío:

Para el diseño de los equipos de filtración se utilizan modelos matemáticos, así como pruebas experimentales; ambos son muy importantes para que el equipo funcione lo mas cercano a las condiciones reales del proceso.

La experimentación es una parte necesaria en cualquier proceso de diseño ya que en filtración no es posible estimar los parámetros con bastante seguridad para adecuarlos al diseño de un equipo de filtración [2]

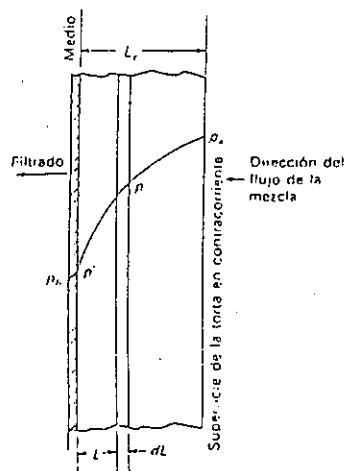
La filtración es un ejemplo de flujo a través de medios porosos, en donde las resistencias al flujo son constantes; sin embargo, en filtración tales resistencias aumentan con el tiempo a medida que el medio filtrante se va obstruyendo. Las principales magnitudes en filtración son la velocidad de flujo a través del filtro y la caída de presión en la unidad. En la filtración a presión constante la caída de presión permanece constante y la velocidad de flujo va disminuyendo con el tiempo.

2.3.1 Fundamentos de filtración de torta.

En la filtración de superficie, el líquido pasa a través de dos resistencias en serie: la de la torta y la del medio filtrante. La resistencia del medio filtrante es importante solo al inicio de la filtración; la resistencia de la torta aumenta con el tiempo pues el espesor de torta depositada en el filtro aumenta. La caída total de presión en el sistema es la suma de las caídas de presión de la torta y la del medio filtrante.

$$\Delta P = \Delta P \text{ torta} + \Delta P \text{ medio}$$

Figura 2.2



2.3.2 Resistencia específica de torta (α)

Teóricamente consiste en la resistencia al flujo de filtrado que se produce debido a la formación de la torta de filtración. Su valor inicial es cero y aumenta con el tiempo. La resistencia de la torta es función de la presión aplicada y el tamaño de partícula, homogeneidad de la pasta, concentración de los sólidos de la alimentación, etc; sin embargo la presión es el factor que más influencia tiene. [18]

2.3.3 Resistencia del medio filtrante (R_m)

La resistencia del medio filtrante, es la caída de presión producida en el momento en que el líquido pasa por el medio filtrante. Generalmente, es importante durante las primeras etapas de la filtración por lo que se puede suponer constante durante esta operación, y obtener su valor a partir de datos experimentales.

La ecuación general para todos los tipos de filtración a presión constante es :

$$d^2t/dV^2 = K_1 (dt/dV)^n \quad (1)$$

2.3.4 Filtración a presión constante :

Para el diseño de los filtros de vacío a presión constante la ecuación fundamental es :

$$dt/dV = (\mu / \Delta P \alpha g_c) (\alpha C V / A + R_m) \quad (2)$$

La ecuación (2) puede escribirse de la siguiente manera:

$$dt/dV = 1/q = K_c V + 1/q_0 \quad (3)$$

$$\text{en donde} \quad K_c = \mu C \alpha / A^2 \Delta P g_c \quad (3.1)$$

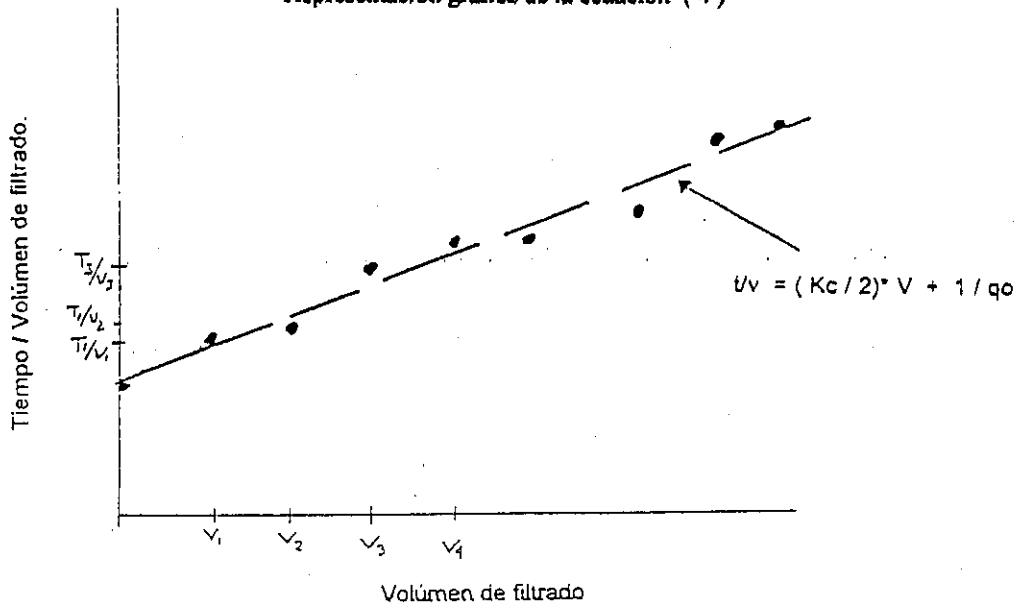
$$\text{y} \quad 1/q_0 = R_m \mu / A \Delta P g_c \quad (3.2)$$

al integrar la ec. (3) entre los límites (0,0) y (t, V) se obtiene:

$$t/V = (K_c/2)V + 1/q_0 \quad (4)$$

Por lo tanto, una representación gráfica de t/V frente a V será una línea recta de pendiente $Kc/2$ y ordenada en el origen $1/q_0$; con ello se obtiene una ec. de regresión lineal en donde se puede calcular R_m y α utilizando las ecuaciones 3.1 y 3.2 conociendo las propiedades del licor filtrado.

Figura 2.3
Representación gráfica de la ecuación (4)



Al realizar pruebas experimentales se puede hallar la variación de α vs ΔP . Ajustando los datos experimentales a ecuaciones de correlación, se halla la siguiente relación:

$$\alpha = \alpha_0 (\Delta P)^s \quad (5)$$

en donde "s" es definido como el coeficiente de compresibilidad de la torta; si su valor es cero, la torta es incompresible; mientras que si su valor es positivo, corresponden a tortas compresibles. Generalmente, su valor está generalmente entre 0.2 - 0.8. Por otra parte, α_0 es una constante determinada en gran medida por el tamaño de las partículas que forman la torta.

2.3.5 Filtración continua:

En un filtro continuo (y rotatorio) la alimentación, el filtrado, y la torta se mueven con velocidades

continuas estacionarias; por otra parte, la presión a través del filtro durante la formación de la torta se mantiene constante. Es evidente que un ciclo del filtro consta de varias etapas en serie (formación de la torta, lavado, secado y descarga). Para el diseño de filtros continuos, todas las ecuaciones anteriores deben ser utilizadas.

La velocidad de producción de sólidos (obtenidos despues de ser filtrada la suspensión) en un filtro continuo rotatorio se calcula por la ec.

$$mc/ At = [[2C \alpha \wedge P_{gc} f n / \mu + (n Rm)^2]^{1/2} - n Rm] / \alpha \quad (6)$$

La ec. (6) se aplica tanto a filtros continuos de vacío como a filtros continuos de presión. Con esta ecuación se puede determinar el área de filtración necesaria para filtrar un determinado tonelaje de suspensión.

2.4 Lavados de tortas de filtración :

Cuando se lava una torta de filtro, la velocidad del líquido de lavado es igual que la velocidad final de filtración, siempre y cuando la presión de lavado sea la misma que la de filtración, que el líquido de lavado tenga las mismas propiedades (o similares) del filtrado y que no haya redistribución de la torta. [1]

La remoción del líquido retenido en los poros de la pasta es de gran importancia en muchos procesos químicos. El lavado es la operación de recuperación de dicho soluto de los poros utilizando un solvente, el cual puede ser miscible o inmisible con el líquido retenido.

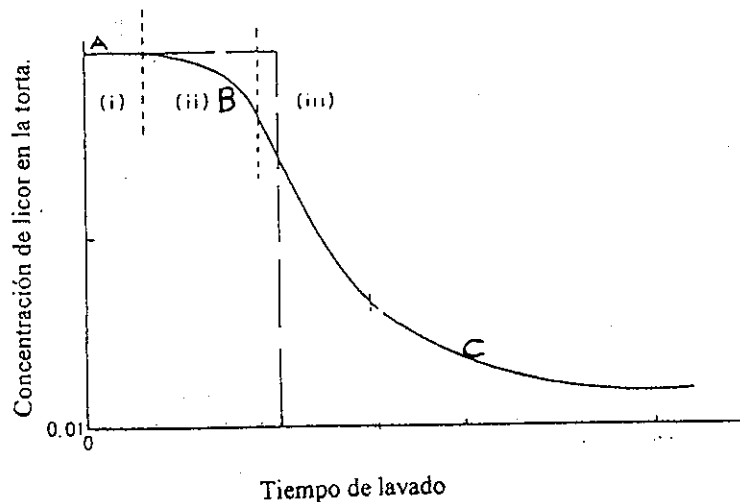
La razón principal del lavado es la de remover las impurezas líquidas de un producto sólido valioso, o mejorar la recuperación del licor de la pasta. El lavado de la pasta está dividido en 3 etapas:

- a) **Lavado por desplazamiento:** en esta etapa, el líquido de lavado "desplaza" al licor retenido en la pasta sin una dilución apreciable. Este es el método ideal para lavar una torta. Cuando el tamaño de las partículas de la torta es pequeño, en condiciones favorables, se puede recuperar hasta el 90 % del licor retenido en la torta. El volumen de líquido de lavado que se requiere para un lavado por desplazamiento, es igual al volumen de filtrado que ha quedado retenido en la torta, o sea ϵAL , donde " ϵ " es la porosidad media de la torta y " L " el espesor de la misma.
- b) **Lavado intermedio:** durante este período, una cierta cantidad de soluto removido se logra por desplazamiento desde los pequeños poros en la torta; la corriente proveniente de esos poros es diluida con

la corriente de los poros grandes; la concentración de licor disminuye rápidamente y el volumen de líquido de lavado que se necesita es similar al de la primera etapa.

- c) **Lavado por transferencia de masa:** luego de los dos estados iniciales, una cantidad de filtrado residual permanece en los finos intersticios de la torta, la cual no ha sido removida por desplazamiento. Aquí, el licor principal es lentamente lixiviado de la torta. Si se utiliza suficiente líquido de lavado se puede reducir hasta cualquier valor deseado el contenido de soluto en la torta, pero el lavado deberá interrumpirse cuando el valor del soluto no recuperado sea inferior al costo de su recuperación. [4]

Figura 2.4
Curva de lavado de soluto en los filtros continuos



2.5 Medios de filtración:

La elección del medio de filtración es con frecuencia, una de las consideraciones más importantes para asegurar el funcionamiento satisfactorio de un filtro. El medio filtrante incluye mallas metálicas y plásticas, papel, platos perforados, etc. En la selección del medio para una filtración dada, se debe alcanzar un equilibrio entre un tejido tan abierto como sea factible para reducir los atascamientos, y tan apretado como sea necesario para evitar la "purga" excesiva de partículas finas. Después que se haya formado sobre el medio filtrante un espesor de torta, la purga se

suele detener puesto que las partículas finas quedan atrapadas en la torta misma. [1]

Para la selección del medio de filtración adecuado para un determinado proceso, es importante conocer las características de la suspensión a filtrar; por otra parte, es importante conocer la reactividad química de la misma así como la temperatura y presión de operación, y el tipo de filtro a utilizar. [3]

Las características más importantes que deben tomarse en cuenta al momento de seleccionar el medio más adecuado de filtración son :

1. Resistencia a los ataques químicos.
2. Suficiente resistencia para sostener la presión de filtración.
3. Resistencia aceptable al desgaste mecánico.
4. Capacidad para descargar la torta con facilidad y limpieza.
5. Capacidad para conformarse mecánicamente al tipo de filtro con el cual se utilizará.
6. Costo mínimo.

En la siguiente tabla se muestran las características de los medios de filtración que más se utilizan en la industria.

TABLA 1

Propiedades de las fibras que influyen en la selección del medio de filtración.

Fibra	Temperatura límite	Resistencia a ácidos	Resistencia a alcalies	Precio respecto al algodón.
Algodón	210F	Mala	Regular	1.0
Policéster	300F	Muy buena	Bucna	2.7
Dinel	200F	Excelente	Excelente	3.2
Nylon	250F	Regular	Excelente	2.5
Acrílico	300F	Excelente	Regular	2.7
Polietileno	165F	Excelente	Excelente	2.0
Polypropileno	175F	Excelente	Excelente	1.75
Pvc.	165F	Bucna	Excelente	2.7
Sarán	160F	Excelente	Excelente	2.5
Teflon	475F	Excelente	Excelente	25.0
Lana	210F	Muy buena	Regular	3.7
Rayón y acetato	210F	Mala	Regular	1.0

TABLA 2

Requisitos mecánicos de medios filtrantes con respecto al tipo de filtro a utilizar:

Tipo de filtro	Necesidades del medio filtrante.
De Placas y marcos	Buenos empaques, estabilidad dimensional.
De Tambor rotatorio	Resistencia a la tensión y la Fricción
Centrífugo.	Conformidad con la forma del tazón de la centrífuga, Resistencia a la tensión.
Horizontal de rotatorio	Rigidez, resistencia al desgaste.
Hojas de presión y vacío	Estabilidad dimensional, facilidad de cosido.

3 : SISTEMAS DE VACÍO

3.1 Fundamentos de la teoría de vacío:

La tecnología de vacío es actualmente una parte esencial en la mayoría de industrias como la de procesos químicos, filtración, generación de energía, producción de textiles, producción de pulpa y papel , y muchas otras. El vacío es obtenido por la remoción de aire o gases de un sistema (recipiente, equipo de procesos, etc). Cuando el aire es evacuado del sistema por algún mecanismo (bombeo), el vacío es obtenido. Se pueden obtener varios grados de vacío dependiendo de cuánto aire sea removido del sistema. En la práctica es imposible obtener un vacío total o un *perfecto vacío* (19)

El grado de vacío que se obtenga en un sistema, es medido por la presión que se va obteniendo al evacuar los gases presentes en él.

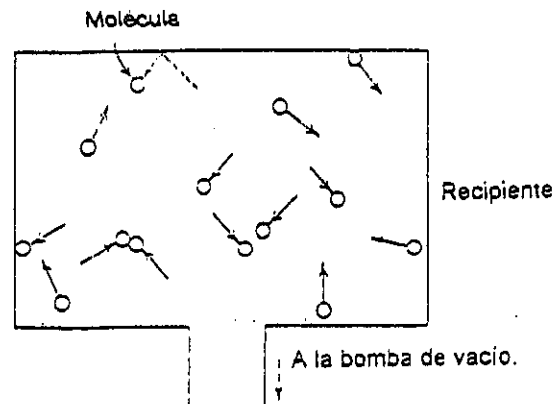
Los sistemas de vacío son frecuentemente clasificados de acuerdo con sus presiones de operación en :

Bajo:	760 a 25 mm Hg
Medio:	25 a 10^{-3} mm Hg
Alto:	10^{-3} a 10^{-6} mm Hg
Muy alto:	10^{-6} a 10^{-9} mm Hg
Ultra alto:	10^{-9} mm Hg y menos.

3.1.1 Naturaleza de un gas:

La palabra *gas* es utilizada frecuentemente en la práctica de vacío para denotar a los gases no condensables y a los vapores . Los gases no condensables (ó gases permanentes) no pueden ser comprimidos al estado líquido, o al sólido a la temperatura ordinaria de cámara. El aire seco es un ejemplo de un gas no condensable y el vapor de agua es el ejemplo de un vapor. Para producir aire líquido es necesario no solamente utilizar un alto grado de compresión, sino también realizarlo a bajas temperaturas .

Figura 3.1
Moléculas moviéndose en un recipiente



Quando un gas se encuentra dentro de un recipiente, (fig.3.1) se puede observar que las moléculas se mueven en todas direcciones y rápidamente a diferente velocidad unas y otras. Cuando una molécula choca contra la pared interna del recipiente, ésta rebota. Como todas las moléculas golpean contra la pared del recipiente, se produce una fuerza o empuje en el recipiente total. La fuerza promedio ejercida por las moléculas por unidad de área es denominada *presión*; esta fuerza es una cantidad fundamental en el trabajo del vacío. [19]

La presión de un gas depende de cuantas moléculas estén golpeando una unidad de área en un tiempo determinado (segundo, minuto, etc) y cuán rápido se muevan. Consecuentemente, la presión disminuirá cuando el gas sea bombeado fuera del recipiente (quedarán muy pocas moléculas en el mismo) y aumentará cuando el gas sea calentado (pues las moléculas se mueven mucho más rápido).

3.1.2 Elementos de un sistema de vacío:

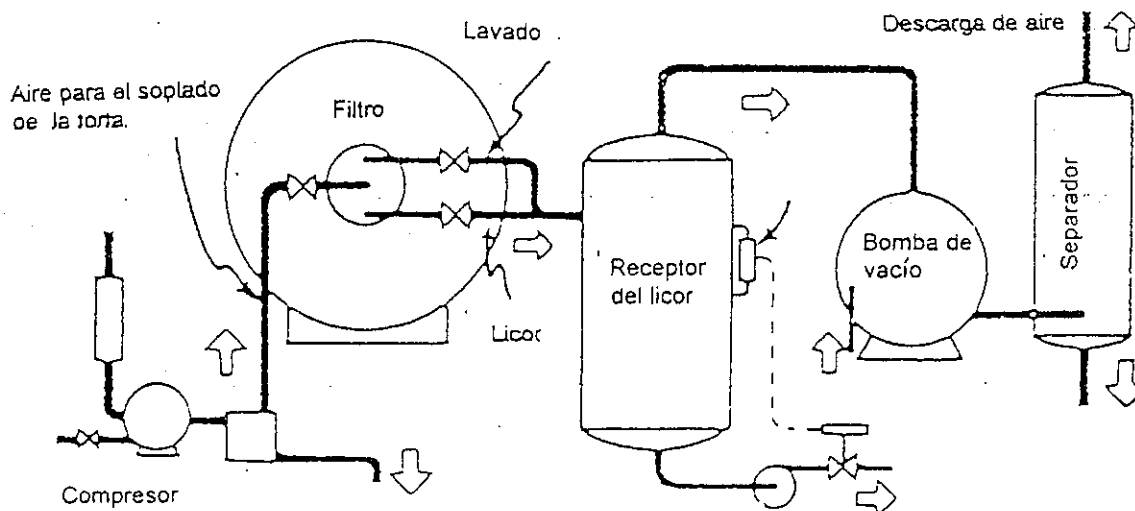
Apesar de las ligeras diferencias entre varios sistemas de vacío, todos ellos poseen algunos elementos en común de los cuales, los mas importantes son el recipiente o cámara de vacío, las bombas y la tubería que conecta al recipiente y a las bombas. Otros componentes incluyen manómetros (medidores de presión de vacío), válvulas, trampas de humedad , sellos, equipo de protección , etc [19]. El recipiente de vacío y varias líneas de bombeo son construidos de vidrio o metales; los metales más comunmente utilizados son el cobre, hierro, aluminio y acero inoxidable.

Es importante tomar en cuenta que dos manómetros son incluidos en el sistema. El primero va en el recipiente o cámara de vacío para medir la presión en el mismo, y el segundo en la tubería para medir la presión en la misma. La válvula de alto vacío hace posible aislar la bomba del resto del sistema.

3.1.3 Algunos tipos de sistemas de vacío:

Los sistemas de vacío son utilizados en diferentes aplicaciones incluyendo impregnación al vacío de metales, moldeado al vacío, evaporación de metales, aceleración nuclear de partículas, etc. La exacta naturaleza del sistema dependerá de su aplicación. Los sistemas de vacío son frecuentemente divididos en "estáticos" y "dinámicos". Un sistema estático es aquel en el que se ha generado vacío y luego, el sistema ha sido sellado (ejemplo, los tubos de vacío de radio y televisión). Los sistemas dinámicos son sistemas continuamente bombeados. Esencialmente, todos los procesos industriales se realizan en sistemas dinámicos y frecuentemente esos procesos requieren una operación cíclica.

Fig. 3.2
Sistema típico de vacío



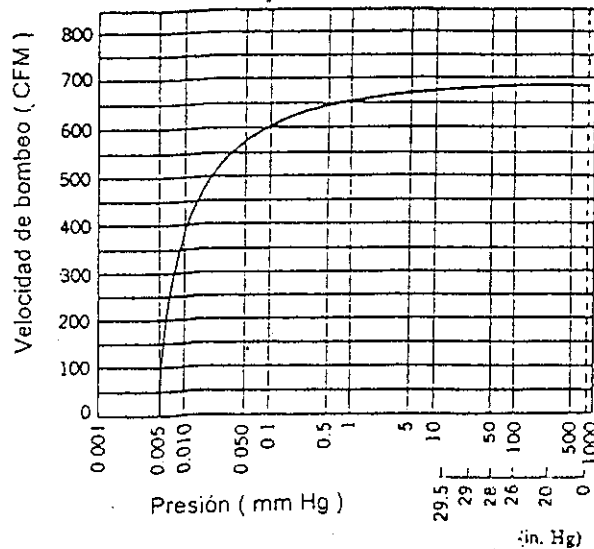
3.1.4 Velocidad de bombeo:

En la operación de los sistemas de vacío es importante conocer la rapidez con que los gases y vapores son removidos del sistema. Esta rapidez (velocidad de bombeo) en cualquier punto en un sistema de vacío es definida como la razón del flujo de gas a la presión en ese punto

$$\text{Velocidad de bombeo (volmen / tiempo)} = \text{flujo de gas} / \text{presión puntual.}$$

Dependiendo de su naturaleza y diseño, una bomba determinada removerá gases y vapores solamente sobre un rango particular de presión; por lo tanto, la velocidad será función de la presión. La presión disminuirá rápidamente cuando la presión mínima obtenible por la bomba esté a punto de ser alcanzada; finalmente, la presión mínima será alcanzada y en éste punto la velocidad de bombeo será cero.

Figura 3.3
Curva típica de velocidad de bombeo para bombas de vacío mecánicas (rotatorias "oil - sealed").



En el montaje de los sistemas de vacío una de las consideraciones más importantes, es la selección de las conexiones entre la bomba y la cámara para mantener a un mínimo las pérdidas por bombeo, pues éstas disminuyen el valor de la velocidad de la operación.

3.1.5 Consideraciones básicas en el diseño de sistemas de vacío.

Los factores principales involucrados en el montaje de los sistemas de vacío son:

- 1) La presión de operación.
- 2) tiempo de bombeo para llegar a la presión de operación.

Esos factores determinan la selección de la bomba adecuada y varios accesorios; la presión de operación es generalmente determinada por el proceso particular de vacío involucrado. Obtener muy bajas presiones de operación significa tener muchísimo cuidado en la fabricación y en las técnicas de limpieza del equipo. El tiempo requerido para que el sistema llegue a la presión de operación está determinado por cuatro factores: volumen que es bombeado, la resistencia al flujo que presentan las líneas de conexión, la cantidad de gas y vapor que debe ser liberado y la velocidad de las bombas.

3.1.6 Diseño de un sistema de vacío:

El diseño específico de un sistema de vacío dependerá de su función; sin embargo, existen algunas reglas que son generalmente aplicables :

- 1) Seleccionar un tamaño de cámara adecuado para el proceso de vacío.
- 2) Seleccionar un conveniente tiempo de bombeo requerido para llevar el sistema a la presión de operación. Este tiempo no es importante en sistemas continuamente bombeados
- 3) Mantener la longitud de las líneas de tuberías a un mínimo. Conociendo esta longitud se puede seleccionar un diámetro el cual minimizará en menos de 20 % las pérdidas de velocidad de bombeo. En el sistema de tuberías deben considerarse las válvulas y accesorios.
- 4) Estimar la velocidad de bombeo requerida en la cámara para la presión a la cual el proceso de vacío será operado.

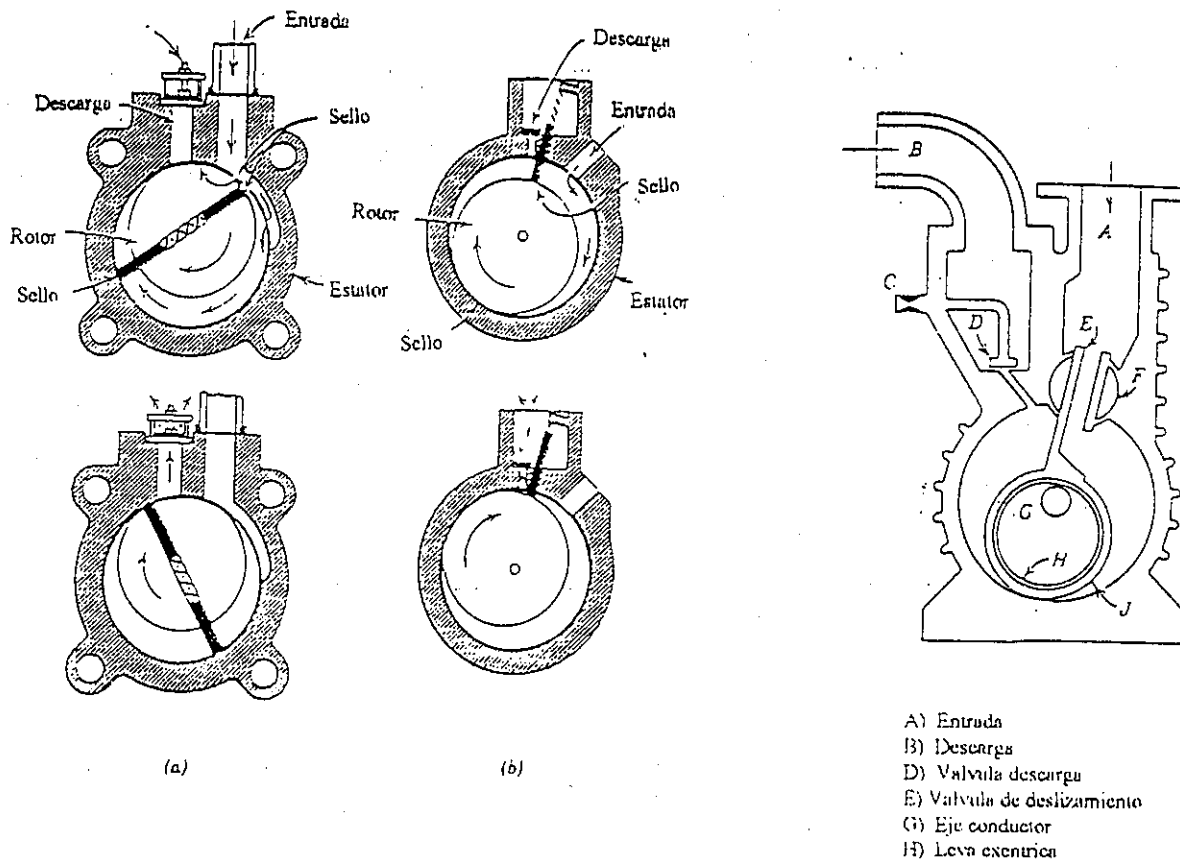
3.2 Bombas de vacío:

Actualmente, los equipos productores de vacío incluyen las bombas rotatorias de anillo líquido , reciprocantes, rotatorias de lóbulo o pistón, de aspas deslizantes , eyectores de vapor, etc. Las más utilizadas son las de anillo líquido y las rotatorias con sello de aceite.[20]

Las bombas rotatorias (o bombas rotatorias con sello de aceite "oil - sealed") como su nombre lo indica, incluye el uso de un miembro rotatorio (rotor) con sello contra la filtración o escape de aire, el cual es logrado por el uso de un lubricante de vacío. [19]

Aunque la variedad de bombas comerciales pueden diferir considerablemente en detalles, todas ellas operan sobre el mismo principio básico. Los tres arreglos más comunes son ilustrados en la figura 3.4

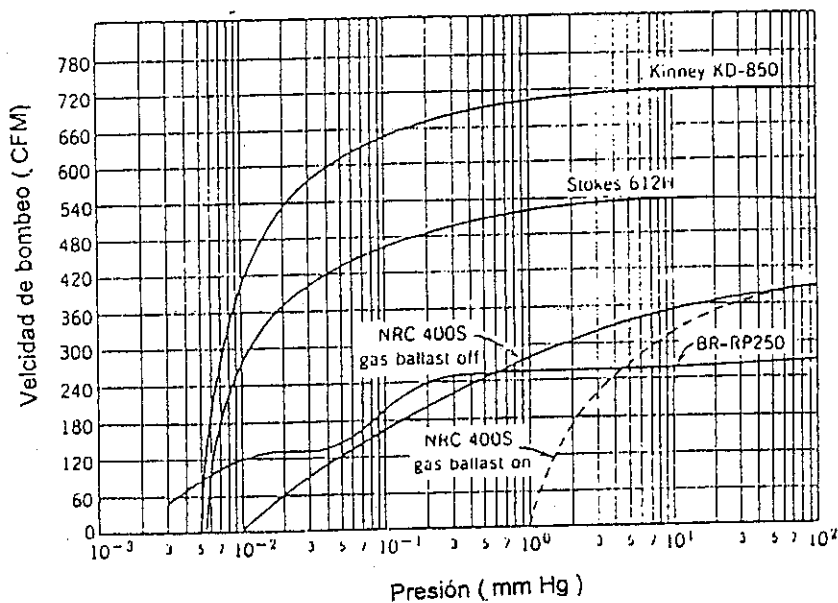
Figura 3.4
Bombas rotatorias selladas con lubricante



De acuerdo con la figura, el aire ingresa a la bomba proveniente del sistema de vacío a través del puerto de entrada; este aire es atrapado, comprimido y enviado a la atmósfera a través del puerto de descarga por medio del arreglo del rotor. El sellado es realizado por dos paletas deslizantes y el punto de contacto entre el rotor y el estator.

Aparte de la presión mínima que se puede obtener con cualquier bomba particular, hay interés en conocer la rapidez con la que la bomba puede reducir la presión en un sistema de vacío al valor requerido. Las empresas fabricantes generalmente especifican la velocidad de bombeo de sus bombas rotatorias a la presión atmosférica. Esta velocidad es llamada *de desplazamiento libre de aire*. Específicamente se refiere al volumen de aire pasado por unidad de tiempo a través de la bomba cuando la presión en la entrada y en la salida son iguales a la presión atmosférica. Generalmente, las bombas rotatorias comienzan a bombear a la presión atmosférica y a medida que la presión es reducida, la bomba se vuelve menos eficiente. El desplazamiento libre de aire de una bomba depende de la velocidad a la cual ésta es operada. Los fabricantes normalmente especifican tanto el desplazamiento de aire como la velocidad a la cual la bomba debe ser corrida. Las velocidades de la bomba generalmente están entre 300 rpm a 650rpm. Se obtienen altos desplazamientos de aire al incrementar la velocidad de la bomba, sin embargo esto no es recomendable. Las unidades más comúnmente utilizadas para las velocidades de bombeo son Litros/ min. y pies cúbicos / minuto (cfm).

Figura 3.5
Curvas de velocidad de bombeo vs. presión requerida.

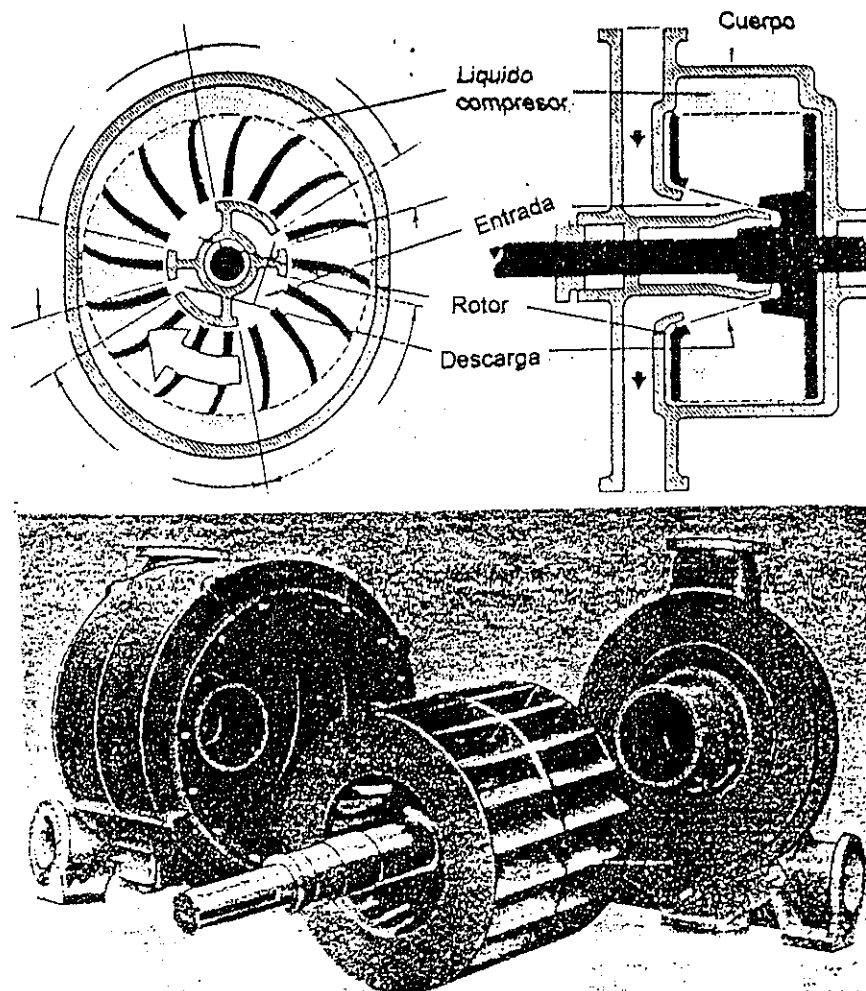


3.2.1 Bombas rotatorias con anillo líquido:

Es uno de los tipos de bombas de vacío más utilizadas; consisten simplemente, en un elemento rotatorio llamado "rotor" y el bombeo es logrado por medio del giro de una cámara rotatoria. La bomba consiste de una envoltura circular y un rotor con una serie de aletas que se proyectan desde el centro del eje. las aletas son envueltas alrededor para formar cámaras. Estas cámaras rotatorias contienen un líquido de compresión que generalmente es agua. Como resultado de la fuerza centrífuga, el agua sigue el contorno de la cubierta cuando rota con el rotor.

Cuando se inicia el ciclo, la cámara rotatoria se encuentra llena con agua. Cuando el rotor se mueve en el sentido de las agujas del reloj, el agua se aleja hasta que la cámara se vacía. Como el rotor continúa girando, la cubierta convergente hace regresar el agua dentro de la cámara rotatoria hasta que ésta se llena nuevamente. Este ciclo se lleva a cabo por cada revolución en una boma de acción simple. (20)

Figura 3.6
Bomba de vacío de anillo líquido.

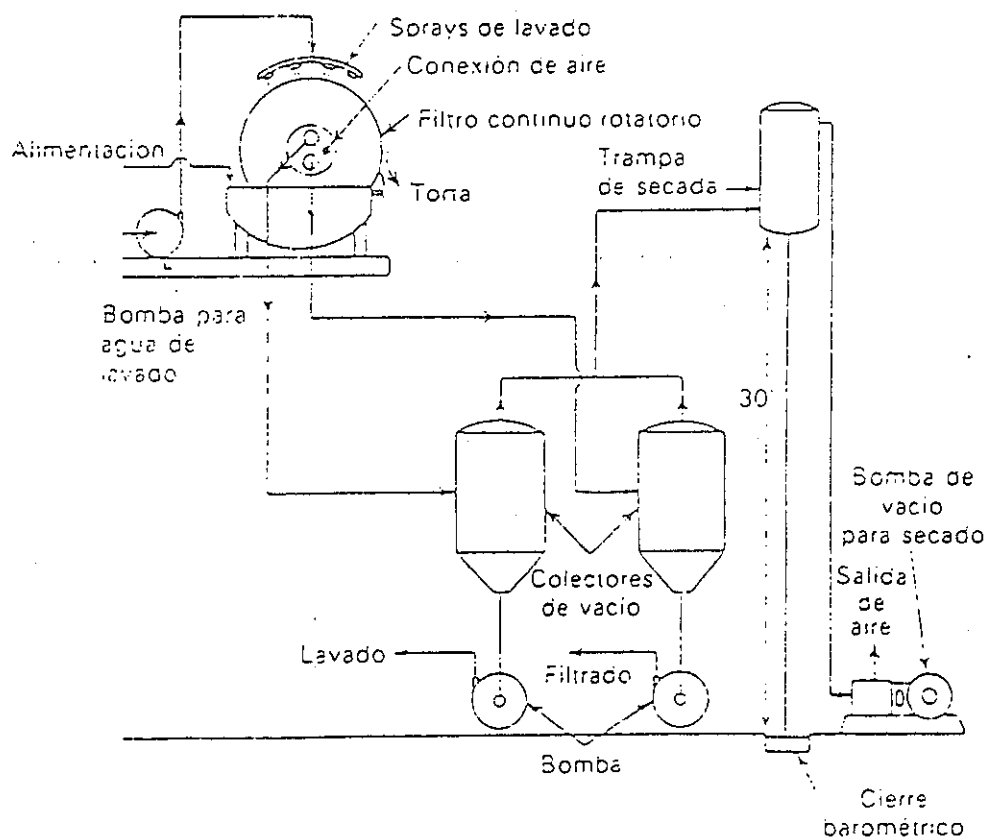


3.2.1.1 Beneficios de las bombas de anillo líquido:

Las bombas de anillo líquido poseen solamente una parte móvil (rotor) y el bombeo se logra sin pistones, válvulas y sin contacto metálico entre los elementos estacionarios y rotatorios; además proporcionan un vacío continuo sin pulsaciones. Estas bombas proporcionan ventajas significantes sobre otros equipos productores de vacío cuando son manejados gases húmedos, contaminados, corrosivos o explosivos; por otra parte, dependiendo de la selección del sistema de vacío, se puede reducir la contaminación ambiental y el consumo de energía.

La presión límite de operación de las bombas de anillo líquido es de 125 psig; en ocasiones consumen más energía que los ventiladores y las bombas reciprocantes. Las bombas de anillo líquido son consideradas menos eficientes que las bombas mecánicas; sin embargo la mayor capacidad de manejo de gases compensa grandemente su relativa baja eficiencia.

Figura 3.7
Aplicación de la bomba de anillo líquido en el proceso de filtración.



Otros tipos de bombas de vacío utilizados en la industria incluyen las de pistón y los eyectores

Fig. 3.8
Bomba de vacío de pistón

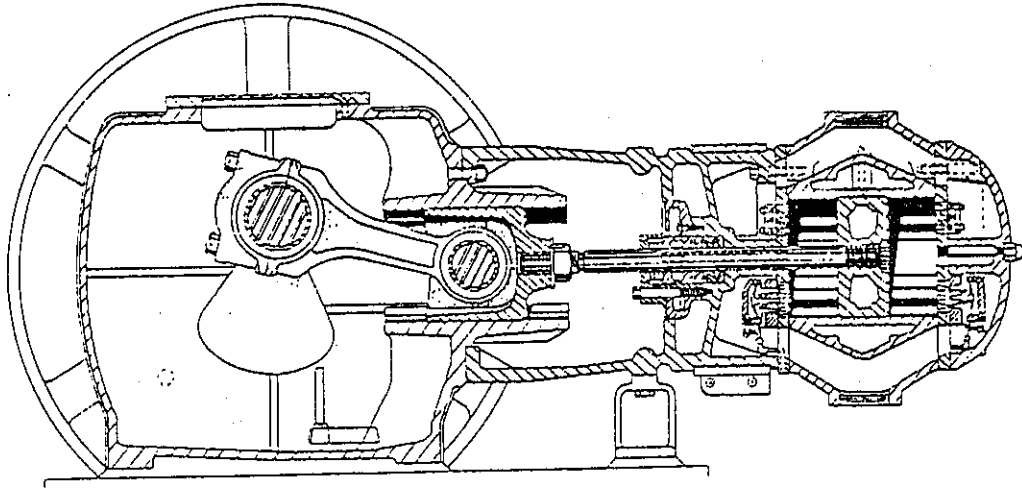
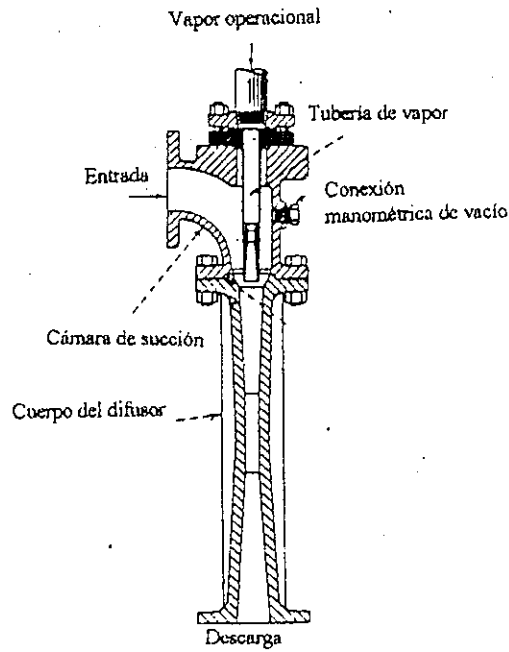


Fig 3.9
Bomba de vacío tipo eyector



3.3 Factores importantes para la selección de bombas de vacío

Los factores que determinan el tipo de bomba requerida para un proceso particular incluyen:

- a) Tamaño del sistema de vacío.
- b) Presión de operación requerida
- c) Naturaleza y cantidad de vapor y gases a ser manejados.
- d) Frecuencia de bombeo del sistema desde el inicio hasta la presión requerida
- e) Tiempo requerido por la bomba para llegar desde el inicio hasta la presión requerida
- f) Efecto de la conexión de líneas de tuberías.

TABLA 3

Intervalos de operación de algunas bombas de vacío comerciales.

Tipo de bomba	Intervalo de operación (mm Hg)
Pistón reciprocante	
1 etapa	760 - 10
2 etapas	760 - 1
Pistón rotatorio sellado con aceite.	
1 etapa	760 - 0.01
2 etapas	760 - 0.001
Centrífuga de multietapas, chorro líquido	760 - 200
Soplador rotatorio de 2 compartimientos (roots)	20 - 0.0001
Eyectores de vapor de agua.	
1 etapa	760 - 100
2 etapas	760 - 10
3 etapas	760 - 1
4 etapas	760 - 0.3
5 etapas	760 - 0.05

4: VÁLVULA AUTOMÁTICA DISTRIBUIDORA DE VACÍO

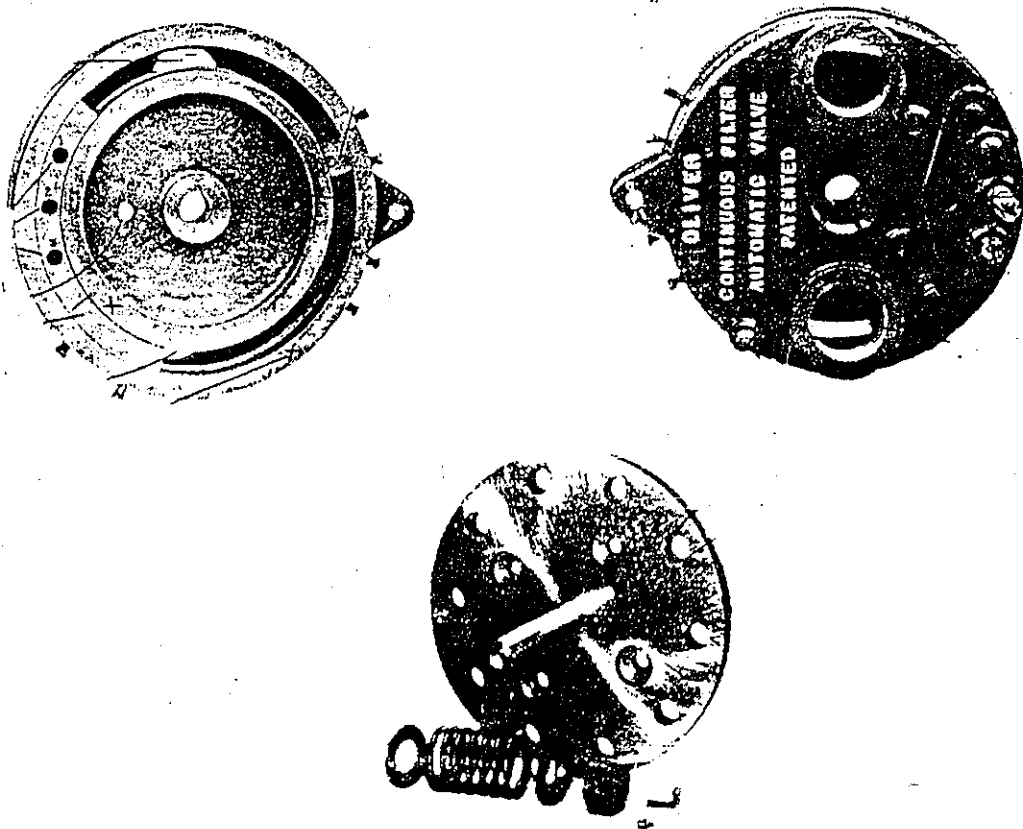
La válvula automática distribuidora de vacío es un elemento fundamental en todo filtro continuo de vacío, pues ésta gobierna el ciclo completo de formación de pasta, lavados, secado y descarga; sin necesidad de ningún control manual, por ello el término "automática" [12].

La válvula automática consta principalmente de :

- a.- Plato perforado
- b.- Cuerpo interno o principal
- c.- Cuerpo externo
- d.- Tuercas o tornillos ajustadores. [12]

Figura 4.1

Válvula automática distribuidora de vacío y sus componentes



Descripción y funcionamiento :

La función de la válvula automática, consiste en la recolección del licor filtrado y de los diferentes lavados que se realizan en el filtro. Esta válvula es conectada al filtro por medio de tuberías que salen de cada uno de los segmentos en los que se divide este equipo. La válvula consta de compartimientos separados los cuales evitan que el licor principal y cada uno de los diferentes lavados se mezclen. En algunos diseños también se incluye un compartimiento especial en donde se insufla aire (blow - back) hacia la descarga del filtro para ayudarla.

Figura 4.2
Sección transversal de la válvula automática.

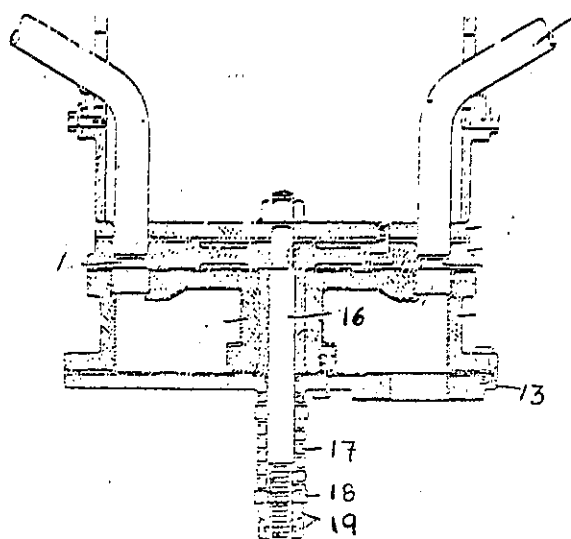


Figura 4.3
Vista en planta de la parte posterior del plato perforado
la cual forma parte integral de la porción estacionaria de la válvula automática

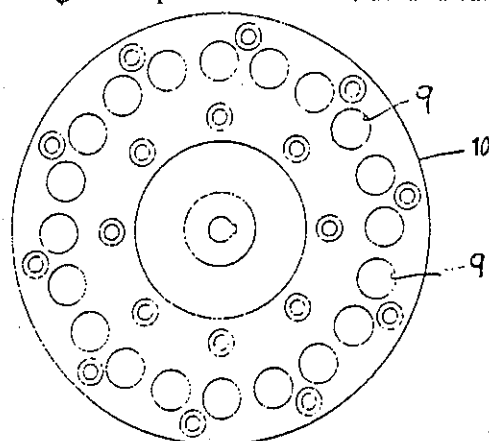
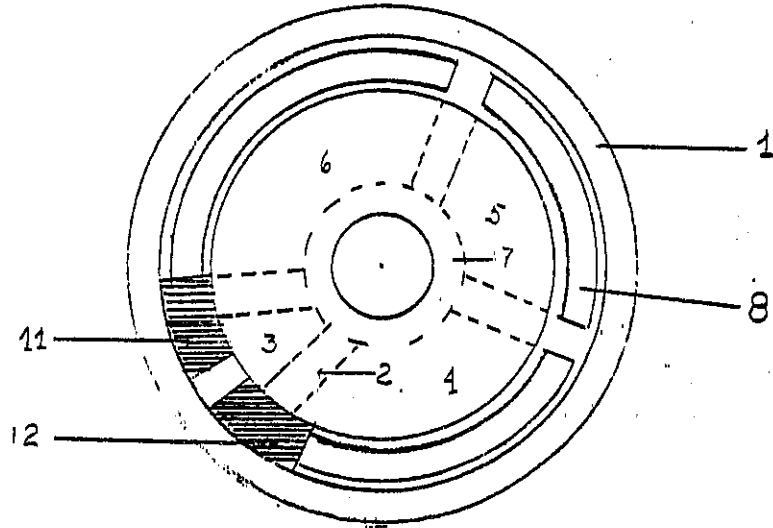


Figura 4.4
Vista en planta del cuerpo principal de la válvula



De acuerdo con las figuras 4.2, 4.3 y 4.4, el cuerpo principal de la válvula (1) está dividido por segmentos radiales (2) en varios compartimientos independientes entre sí (3, 4, 5 y 6); los segmentos radiales (2) terminan en sus extremos interiores en un marco concéntrico al eje central de la válvula (7). Formado en la superficie superior del cuerpo de la válvula, se encuentra un canal (8), diseñado para descansar sobre los agujeros (9) del plato perforado (10).

Asentados dentro del canal (8) sobre el compartimiento (3), se encuentran un par de puentes espaciados (11) y (12); las partes expuestas de los cuales están niveladas (o al mismo nivel) con la cara externa del cuerpo de la válvula (1). Cuando el plato perforado (10) rota sobre la superficie superior del cuerpo de la válvula (1), cada uno de los agujeros (9) se mueve en registro con el canal (8); pero es anulado periódicamente conforme pasa sobre los puentes (11) y (12).

Asentado sobre la cara inferior del cuerpo de la válvula (1), se encuentra su cubierta o cuerpo externo (13) provista con aberturas que corresponden a los compartimientos (3, 4, 5 y 6); es decir, si el líquido filtrado ingresa por uno de estos compartimientos, saldrá por la abertura correspondiente de tal forma que no se mezclará con los otros líquidos que ingresen en los otros compartimientos (que en este caso pueden ser de lavados). Una de estas aberturas se comunica con un acople (14), diseñado para estar conectado a una fuente de presión reversible (ó blow-back); y a través de la cubierta de la válvula (ó cuerpo externo) con el compartimiento (3).

También en la cubierta de la válvula (13) se encuentra una conexión flexible (15) diseñada para comunicar la fuente de vacío con los compartimientos (4, 5 y 6). El propósito de tener estos compartimientos es el de permitir

una separación tanto del filtrado principal como de los filtrados de lavado, si estos son deseados en la operación del filtro.

Como un ejemplo particular, los compartimientos (4, 5 y 6) pueden ser considerados como un solo compartimiento, a través del cual cada compartimiento de filtrado está sujeto a presión de vacío sucesivamente durante el ciclo en el que el filtro recoge la pasta. La cubierta de la válvula (13) está acoplada a la válvula (1), y este ensamblaje es apresado en su posición de operación contra el plato perforado (10) por medio de una varilla en el centro de la válvula con tuerca ajustable (16). Rodeando la parte exterior de la varilla se encuentra un resorte (17) y en el extremo final del mismo está un anillo (18). Enroscado sobre la parte final externa de la varilla se encuentra una tuerca de doble seguro (19). [11]

La válvula automática se diseña de acuerdo a las condiciones de filtración (cantidad de filtrado / hora), los lavados necesarios, si es necesario acoplar una corriente de aire para desprender la torta, etc. Por otra parte, los materiales para su construcción dependen de las características químicas del licor filtrado; sin embargo, generalmente se utiliza acero al carbón, acero inoxidable y mas recientemente los materiales sintéticos (polipropileno, polietileno, fibra de vidrio, etc.)

5 : PRUEBAS A PEQUEÑA ESCALA PARA EL DISEÑO DE FILTROS DE VACÍO

En cualquier aplicación de filtración continua, dos o más de los siguientes aspectos toman lugar en el proceso :

- a) Formación de la torta filtrada.
- b) Desagüe de la torta a un determinado contenido de humedad.
- c) Lavado de la torta para remover licor valioso o indeseado.
- d) Secado térmico de la torta.
- e) Descarga de la torta .

La etapa que más lentamente se lleve a cabo determinará el tamaño del equipo, y esto se logra con base en pruebas experimentales a escala, ya sea a nivel de laboratorio o en planta piloto, ya que cada aspecto influirá en forma determinante en el tamaño del filtro requerido. [18]

Cuando se va a seleccionar un equipo de filtración, la realización de pruebas experimentales es muy importante puesto que son muchos los factores que deben ser considerados, y muchos los tipos de filtros que hay disponibles en el mercado, lo cual complica la selección de un equipo de filtración para un proceso particular, por lo cual, con las pruebas el trabajo de selección se facilita [3].

Los factores más importantes a tomar en cuenta para la selección de un determinado equipo de filtración son los siguientes :

- 1) Carácter de la suspensión.
- 2) Nivel de producción deseado.
- 3) Las condiciones de proceso.
- 4) Los resultados requeridos.
- 5) Los materiales de construcción.

1.- Características de la suspensión:

Indican si la suspensión puede o no puede filtrarse en proceso continuo y que tipo de filtro es el más adecuado, dependiendo del tamaño de partículas, tiempo de sedimentación de la suspensión, tiempo de formación de la torta, etc. ; por otra parte, estas características también determinan la selección más adecuada del equipo de filtración

continua. [3]

2.- Nivel de producción:

Indica si un filtro continuo debe ser utilizado en el proceso. Altos niveles de producción favorecen la filtración continua debido a que se reducen los costos de trabajo. Con bajos niveles de producción la filtración continua no se justifica.

3.- Condiciones de proceso:

Algunas veces limitan severamente la selección de un filtro; por ejemplo un filtro de vacío podría no ser adecuado debido a las bajas presiones de vapor o temperaturas del licor filtrado. La resistencia química y los requerimientos de temperatura pueden limitar la selección del medio filtrante, lo cual en un momento dado puede influenciar fuertemente en la selección del equipo.

4.- Resultados requeridos:

Este aspecto es particularmente importante en la decisión de cuál unidad podría ser la más adecuada. Si se utiliza filtración continua los requerimientos de lavado, así como el grado de separación del licor filtrado respecto a los lavados, tienen un considerable significado.

5.- Materiales de construcción:

Tienen influencia en la selección del equipo ya que afecta directamente el precio del mismo que depende también de las dificultades de fabricación; sin embargo en años recientes los plásticos han hecho que los equipos de filtración se vuelvan bastante económicos en muchos tipos de proceso en donde se manejan productos corrosivos. Estos son útiles si la temperatura y la presión no son excesivamente altos. [3]

Generalmente, uno de estos aspectos es más importante que los demás y cada uno debe ser evaluado en las pruebas a escala. La forma en que esos factores se relacionan con un determinado tipo de equipo de filtración se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 4
Guía para la selección del equipo de filtración adecuado:

Características de suspensión	Filtración rápida	Filtración media	Filtración lenta	Diluida	Muy diluida
Vel. de Formación de torta	Pulg/seg.	Pulg/min	0.05-0.25 pulg/min	<0.05 pulg/min	no hay torta.
Conc. de sólidos	>20%	10 - 20 %	1 - 10%	< 5%	<0.1%
Vel. de sedimentación.	muy rápida	rápida	lenta	lenta	
Vel. de prueba de hojas. (Lb/hr.pie ²)	>500	50 - 500	5 - 50	<5	
Vel. de filtración (gal/min.pie ²)	>5	0.2 - 5	0.01-0.02	0.01-2	0.01 - 2
FILTROS					
Continuos al vacío.					
Tambor compart. multiple	X	X	X		
Tambor compart. simple	X				
Mesa Horizontal (pan- filter)	X	X			
Bandeja basculante	X	X			
Banda horizontal	X	X			
Dicos.	--	X	X		
De hojas por lotes	--	X	X	X	X
De succión por lotes	X	X	X	X	X

" X " indica que el filtro es adecuado para las características que presenta la suspensión.

Contrario a las operaciones como transferencia de calor, en filtración no es posible estimar los parámetros con suficiente seguridad para diseñar un equipo de filtración adecuadamente, ya que la misma sustancia química puede tener amplias diferencias de permeabilidad dependiendo de las condiciones y el proceso. El tamaño de partícula y la forma, varían con el tratamiento, el bombeo, almacenaje, etc. [3]

A menos que se hayan obtenido datos exactos, se deben realizar pruebas para determinar las necesidades de un filtro para un problema dado de filtración. Afortunadamente, los equipos que se necesitan para realizar estas pruebas son relativamente sencillos y de pequeña escala. Obviamente, se sabe de antemano si se va a utilizar la filtración al vacío o a presión; de otro modo, es necesario resolver esta duda con las pruebas preliminares. [1]

Como se menciono anteriormente, la filtración al vacío se utiliza generalmente para procesos continuos cuando el tonelaje de producción es muy grande. Si se utilizara un filtro de presión se tendría un gran problema, pues para retirar la torta obtenida es preciso detener el equipo cuando la tela filtrante se sature, y ello conlleva una gran pérdida de tiempo. Por otra parte, el tiempo de formación de la torta es otro factor importantísimo que indica si es

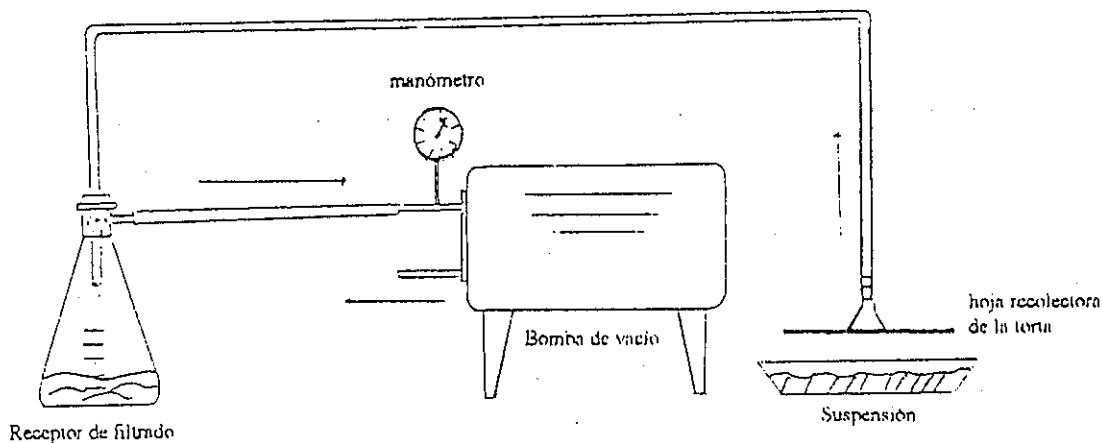
práctico utilizar la filtración a presión o la filtración al vacío para un determinado proceso, aún cuando el tonelaje de producción sea muy grande.

Si en las pruebas preliminares una torta con un espesor de $1/8''$ no puede formarse bajo vacío en menos de 5 minutos aproximadamente, la filtración continua no es recomendable. Esta es una prueba que debe realizarse en los equipos de pequeña escala para asegurarse el tipo de filtración a utilizar. [3]

5.1 Pruebas al vacío y test de hojas.

El equipo necesario para realizar las pruebas en pequeña escala es sencillo y bastante práctico. Este consta de un marco con anillo de presión para colocar la tela filtrante en forma tensa. El marco se conecta a través de un matraz earlenmeyer el cual también está unido a la bomba de vacío. El tamaño del marco no debe ser menor de 4.3 pulgadas de diámetro (0.1 pulg² de área de filtración).

Figura 5.1
Diagrama del equipo necesario para realizar el test de hojas o marco

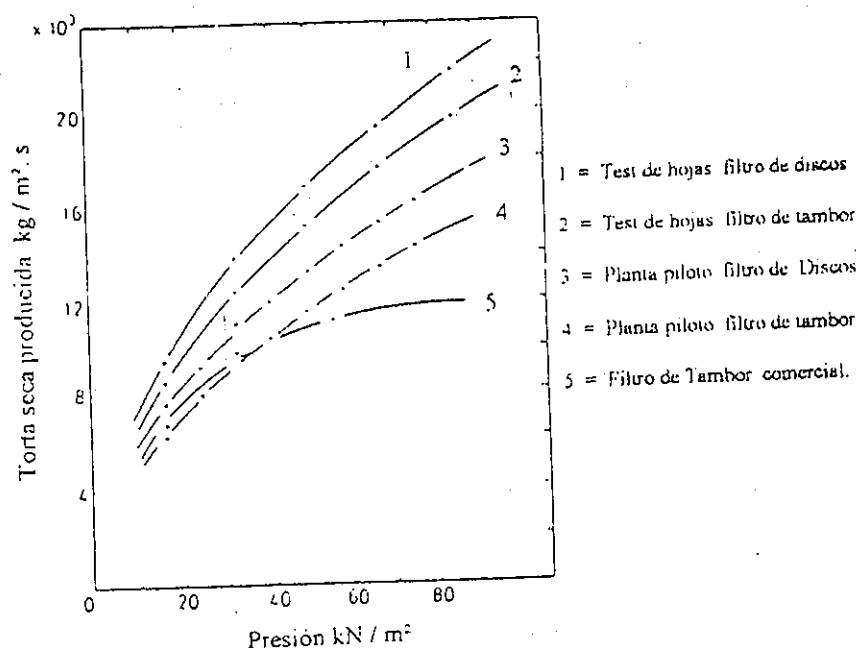


Para realizar las pruebas, primero se conecta el vacío y posteriormente se sumerge completamente la hoja o marco de prueba en el material que se va a filtrar durante el tiempo suficiente para que se formen 6 mm. de torta. Este tiempo no debe ser mayor de 4 minutos, y la lechada debe agitarse suavemente. Luego entonces se retira el marco y se mantiene con la tubería de drenaje hacia abajo, para permitir su desecación. Sin desconectar el vacío, se puede sumergir el marco en un tanque de agua u otro licor de lavado y a continuación se vuelve a desecar. Por lo común, unas cuantas pruebas preliminares aproximadas a diferentes presiones de vacío indicarán el intervalo apropiado de tiempo sobre el cual se formarán tres o más tortas de diferentes espesores. Posteriormente se pueden realizar pruebas variando la temperatura, concentración de suspensión, el nivel de vacío, etc. El test de hojas o marco, se utiliza para predecir el funcionamiento de los filtros de tambor y de discos.

Durante estas pruebas, los datos primarios son el tiempo total de filtración, el volumen de filtrado, el espesor y uniformidad de la torta, la masa de torta formada (tanto húmeda como seca) a las diferentes lecturas de vacío. Es importante conocer la temperatura y la concentración de la suspensión. Otras observaciones importantes son la velocidad de lavado y su eficiencia, el comportamiento en la desecación (si se agrieta o no la torta), formación de espuma , etc.

Figura 5.2

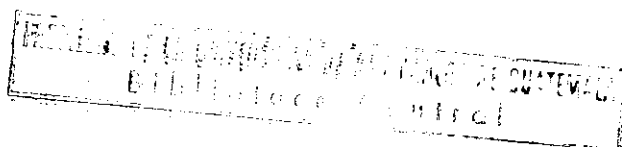
Comparación de curvas obtenidas con el test de hojas, planta piloto y escala comercial para un filtro rotatorio de vacío.



Para la prueba con embudos, el marco se reemplaza con un embudo de buchner en el cual se coloca la tela filtrante. Con el vacío conectado, se vierte en el embudo la suspensión en cantidad predeterminada para producir una torta de espesor deseado, las observaciones a realizar son la mismas que en la prueba de hojas o marco. Las pruebas de embudo simulan el desempeño de los filtros horizontales de vacío. [1]

Los resultados de pruebas en pequeña escala se determinan como el peso seco de los sólidos o el volumen de filtrado por unidad de area y por ciclo. Por otra parte, con las pruebas a escala se puede determinar la velocidad de filtración, así como el tamaño del filtro y el espesor de torta que se obtiene a diferentes presiones. Se recomienda pedir información a empresas fabricantes. Es importante recalcar que cuando se haga el diseño del equipo de filtración se deje un factor de seguridad entre el 10 - 20 % del tamaño calculado. [1]

El test de hojas proporciona resultados muy confiables los cuales se pueden extrapolar al momento de realizar el diseño del equipo industrial.



6: FILTROS HORIZONTALES ROTATORIOS DE VACÍO (PAN FILTER)

6.1 Características y funcionamiento del sistema de filtrado:

El filtro horizontal rotatorio de vacío (Pan - Filter) es uno de los tres tipos de filtros continuos de vacío más utilizados en la industria de procesos debido a la diversidad de sus aplicaciones. Este filtro se utiliza principalmente en procesos en donde se requiere una separación máxima entre el licor de filtrado y la torta; ya que posee un sistema de lavado a contracorriente que permite una eficiencia de separación excelente.

El filtro horizontal rotatorio de vacío esta diseñado principalmente para el filtrado de suspensiones que poseen sólidos densos y pesados, y cuyo tamaño de partícula no sea muy pequeño. Por otra parte, su funcionamiento es excelente para suspensiones en las que los sólidos sedimentan rápidamente. (ver tabla 4) Se utilizan principalmente en la filtración de lodos provenientes de la industria metalúrgica, en la filtración de yeso y residuos de fosfato de roca en el proceso por vía húmeda de ácido fosfórico, en el lavado de pulpas, etc. [1] El filtro horizontal rotatorio está limitado a suspensiones que puedan formar un mínimo de 0.75 pulgadas de torta en un periodo entre 30 - 60 segundos. Este espesor de torta es necesario para una eficiente descarga. [3]

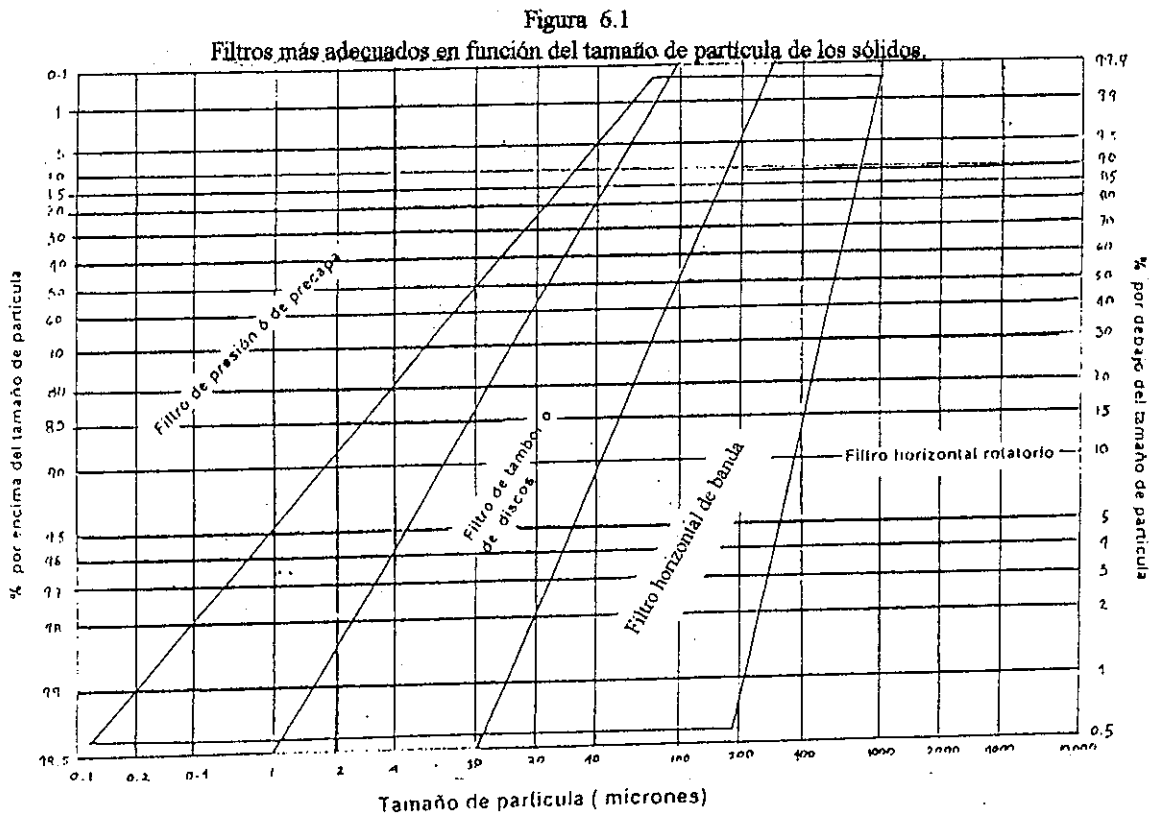
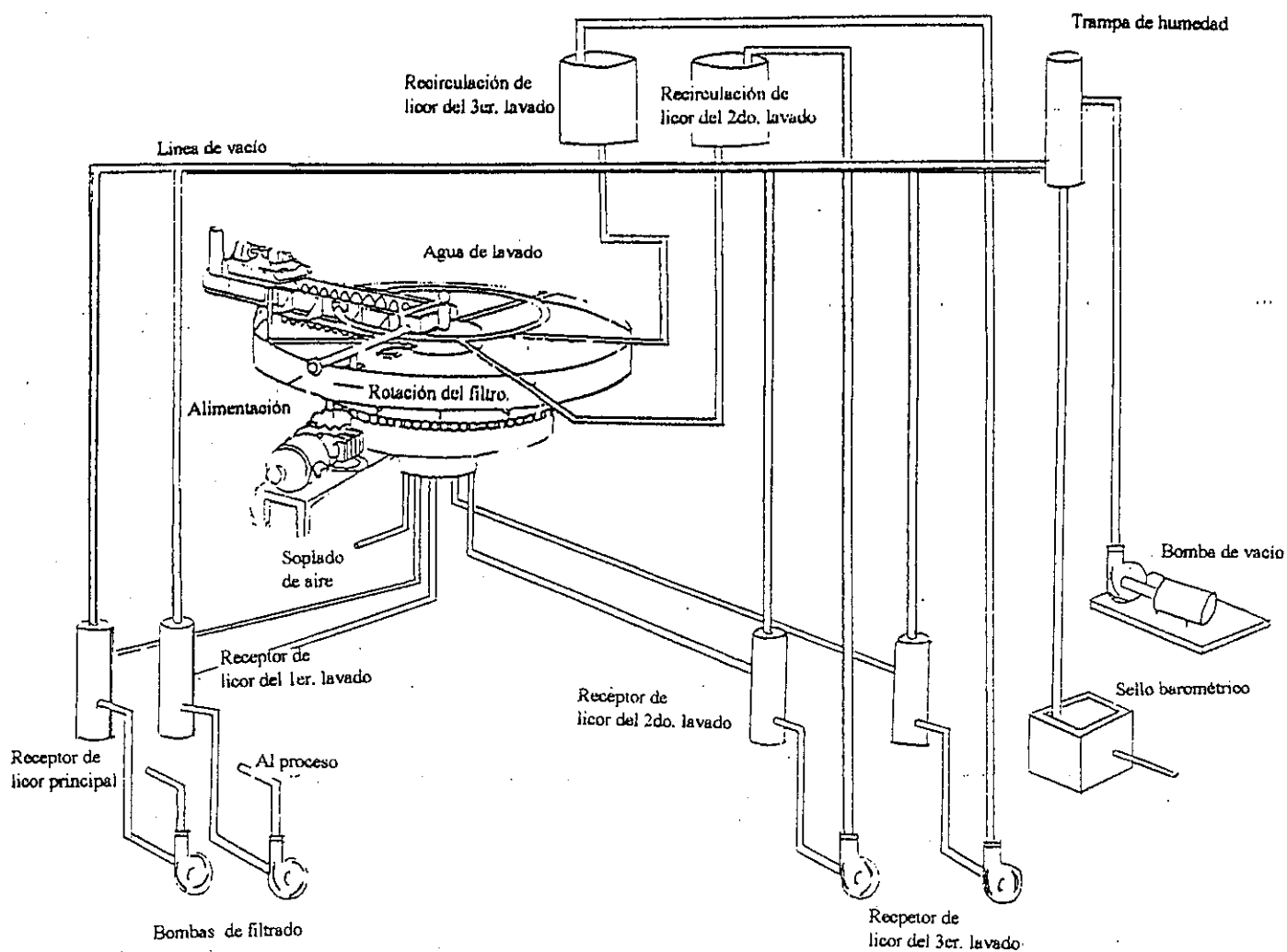


Figura 6.2
 Instalación típica de un filtro horizontal rotatorio de vacío en una planta de procesos.



El filtro horizontal rotatorio consiste básicamente de una superficie filtrante, la cual rota en un plano horizontal y sobre un eje vertical (la gravedad ayuda al flujo del licor de filtrado); una válvula automática, la cual se encarga de la recolección del licor principal y de cada uno de los diferentes lavados que se realicen, y un sistema de vacío el cual es el elemento principal para el funcionamiento de todos los tipos de filtros de vacío. [8]

Figura 6.3
Vista superior del filtro horizontal rotatorio

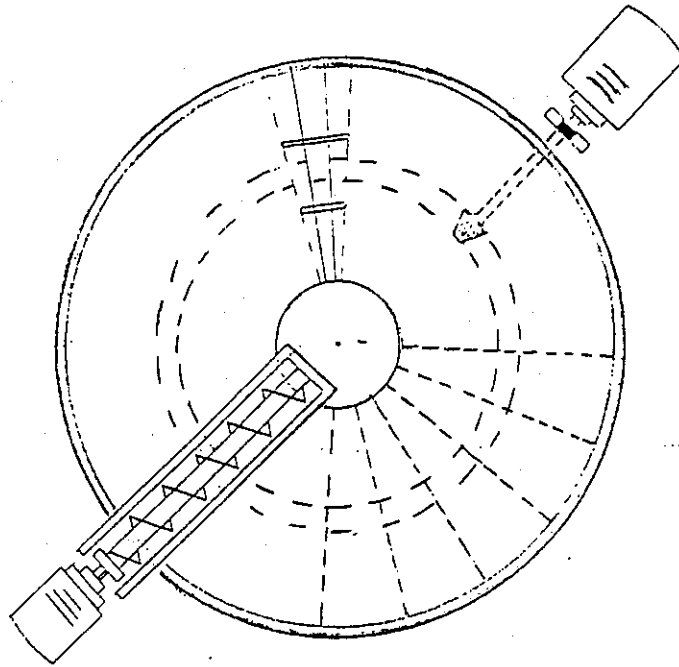


Figura 6.4
Vista lateral del filtro horizontal rotatorio de vacío.

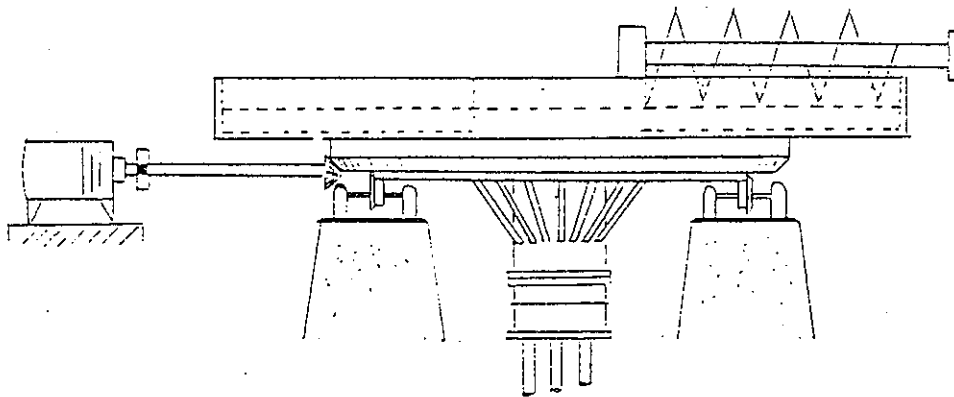
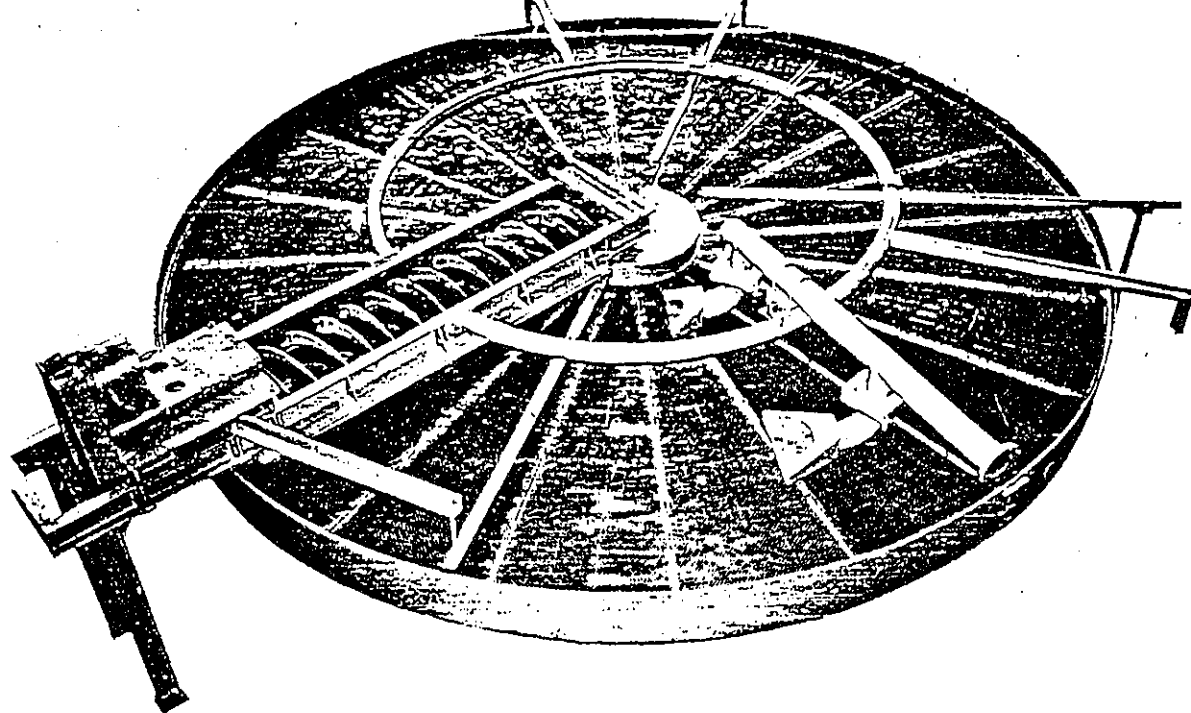


Figura 6.5
Filtro horizontal rotatorio de vacío



De acuerdo con las figuras 6.3 , 6.4 y 6.5, la superficie filtrante incluye una artesa o recipiente anular definido por su base y una pared interna y externa. El interior de la artesa está dividido en 20 compartimientos o secciones por medio de vigas radiales las cuales también sirven de soporte al medio filtrante. Cada compartimiento sirve como colector de líquido filtrado y posee una abertura en la base por donde el vacío generado por la bomba succiona el líquido. La tela filtrante es soportada por malla metálica la cual va ensamblada en la parte superior y radialmente a las vigas.

La tela filtrante es asegurada y sujeta por medio de unos rodillos que sirven para prensar y unir dos secciones de tela, acomodados en cavidades semicirculares por encima de las vigas y dispuestos radialmente. La estructura así descrita conforma una artesa o " PAN " anular dividido en varios compartimientos filtrantes contiguos e independientes unos de otros.

Unida en la parte posterior de la base de la artesa y apoyada coaxialmente con ésta, se encuentra una válvula tubular (A), la cual es cerrada en su extremo inferior por un plato tubular (B). Asegurado al plato tubular se encuentra un plato perforado (C); ambos provistos de un anillo circular formado por agujeros alineados. (ver fig. 4.3) Cada agujero comunica con cada compartimiento de filtrado por medio de tuberías de filtrado, las cuales están colocadas entre la sección tubular y los platos perforados. Acoplado al plato perforado se encuentra el cuerpo principal de la válvula automática. (D)

6.2 Sistema de tracción

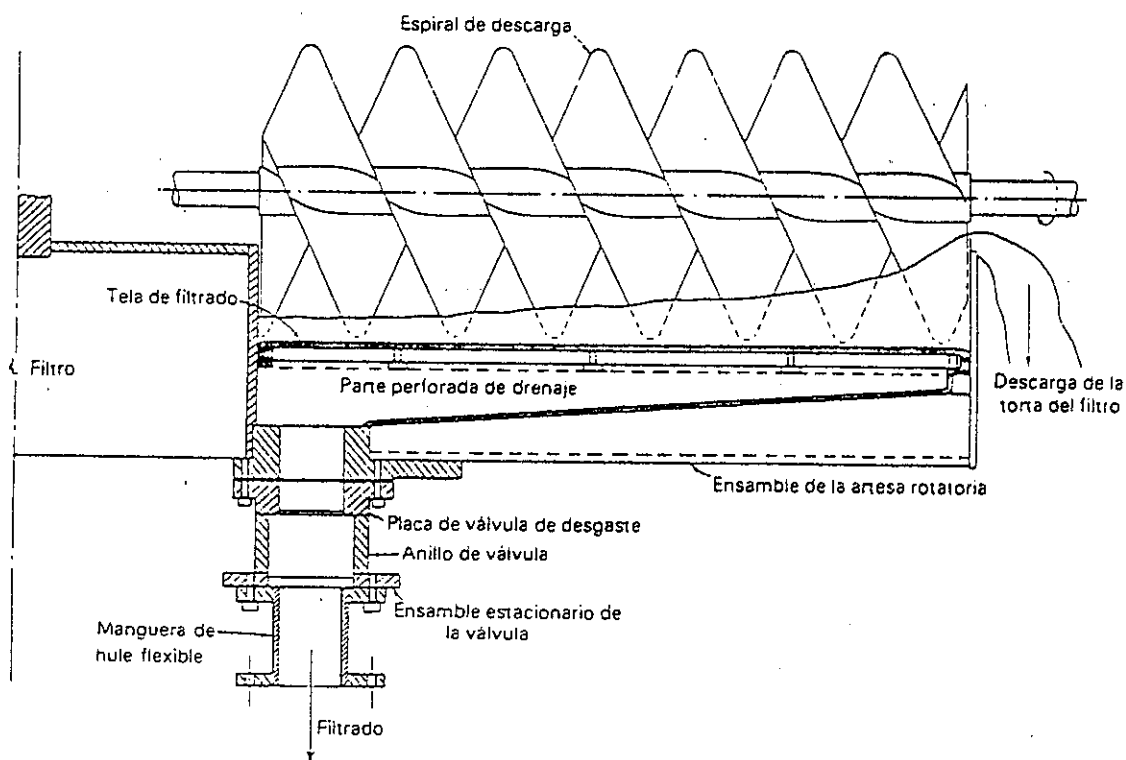
Unido a la parte externa o posterior de la base de la artesa (ver fig. 6.3) se encuentra un anillo dentado el cual sirve como engranaje de transmisión y va encajado a un piñón. El piñón va unido al extremo final del eje de un motor de velocidad variable. Sujeto en la parte interna del anillo de transmisión se encuentra un riel circular el cual descansa sobre unos rodillos. Los rodillos van sujetos y soportados por unas chumaceras, las que van montadas sobre pilares de concreto u otro.

Cuando el motor de velocidad variable es accionado, el piñón induce al anillo de transmisión a moverse causando el movimiento giratorio del filtro sobre los rodillos que van acoplados al riel circular. Debido a que la válvula automática no se mueve, se induce vacío a través de ella succionando licor por los compartimientos y llevándolos a cada sección de la válvula, la cual está diseñada para recolectar el licor principal y cada uno de los lavados en secciones diferentes evitando que se mezclen (ver sección 4).

6.3 Sistema de descarga de la torta

La descarga de la torta filtrada se encuentra al final del ciclo de filtración y es realizada por un tornillo transportador, el cual gira acorde con la velocidad del filtro. El tornillo transportador va montado sobre un marco estacionario y acoplado al filtro por un marco que se encuentra sobre la base central de la artesa. Entre el tornillo transportador y la tela filtrante, se deja un espacio aproximado de 1/8 pulg. para evitar que la misma sea rasgada; por lo tanto, la torta no es retirada completamente y ello reduce la capacidad del filtro. Esta torta residual debe ser retirada pues a medida que el proceso de filtración continúa, ésta se compactará a un punto en donde la filtración se volverá antieconómica.

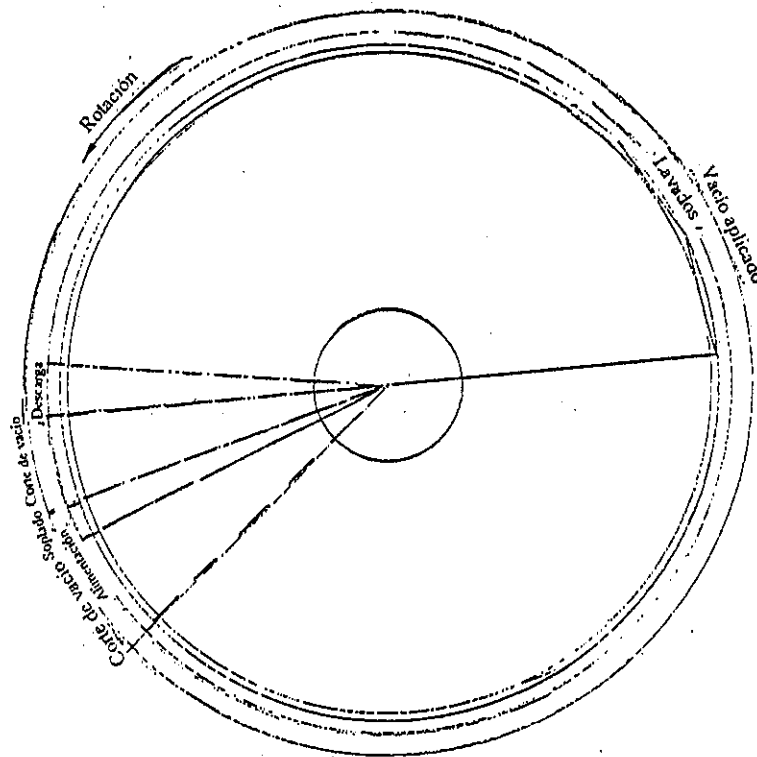
Figura 6.6
Descarga de torta por medio del tornillo transportador.



Para evitar el bloqueo del medio filtrante por el residuo de torta no retirada, ésta es sometida a una presión positiva ("blow back") la cual es controlada por la válvula automática en el punto de alimentación de la suspensión, por lo que es levantada del medio filtrante y al mismo tiempo mezclada con la suspensión que ingresa al filtro logrando con ello la redisolución de la misma, con lo cual se evita la formación de una capa compacta. [11].

El filtro generalmente gira a una velocidad de $1/3 - 1$ rpm de donde la tercera parte del tiempo de ciclo, es utilizado en filtración de licor principal. El tiempo restante del ciclo se utiliza para lavados, desecación y descarga de la torta.

Figura 6.7
Ciclo de operación del filtro horizontal rotatorio de vacío y su válvula automática.



Obviamente, el diseño del filtro horizontal rotatorio de vacío puede ser modificado en cualquiera de sus secciones con el objetivo de mejorarlo.

6.4 Ventajas de los filtros horizontales rotatorios:

- 1.- Permiten una elección independiente del espesor de la torta, el tiempo de lavado y el ciclo de desecación.
- 2.- Filtran eficientemente sólidos pesados y densos.
- 3.- Permiten la inundación de la torta con disolvente de lavado y se adaptan con facilidad al lavado o lixiviación a contracorriente

6.4.1 De proceso

- 1.- Mucha más alta capacidad por pie cuadrado, debido a las máximas áreas de salida a través del sistema de drenaje y a la válvula de filtrado aerodinámica.

- 2.- Muy baja humedad de la pasta debido a la alta capacidad hidráulica y de aire; vacío entre 20 - 25 " Hg.
- 3.- Muy eficientes tasas de lavado con buenas separación sobre un simple desplazamiento o en sistemas a contracorriente.

6.4.2 Mecánicas :

Mínimo mantenimiento debido a :

- 1.- Diseño y construcción simple.
- 2.- Medio filtrante fijo, soportado sobre una cubierta con drenaje permanente
- 3.- Espacio entre la válvula de filtración y el filtro para minimizar la fricción entre ellos .

6.4.3 Operativas :

- 1.- Larga vida de la tela filtrante.
- 2.- Fácil reemplazo de la tela.
- 3.- Completamente automático.
- 4.- Pocas partes en movimiento y diseño simple. [9]

6.5 Desventajas de los filtros horizontales rotatorios de vacío:

- 1.- Emplea una gran cantidad de espacio de piso por unidad de área de filtración
- 2.- La construcción es más costosa que la de los filtros de tambor.
- 3.- No se puede retirar la torta completamente del medio filtrante .
- 4.- Este filtro generalmente se utiliza para materiales que filtran rápido. [1]

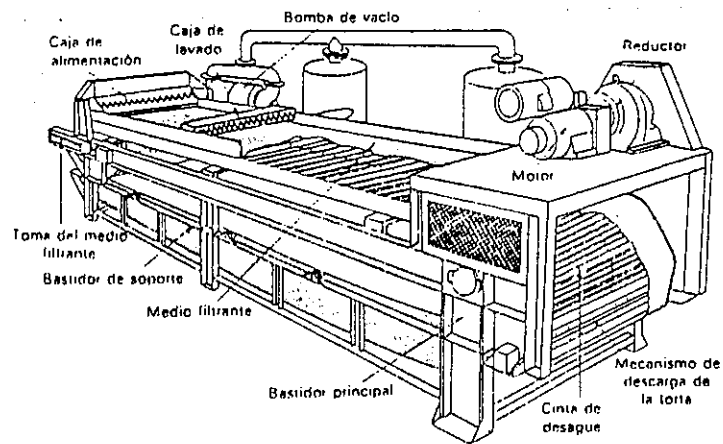
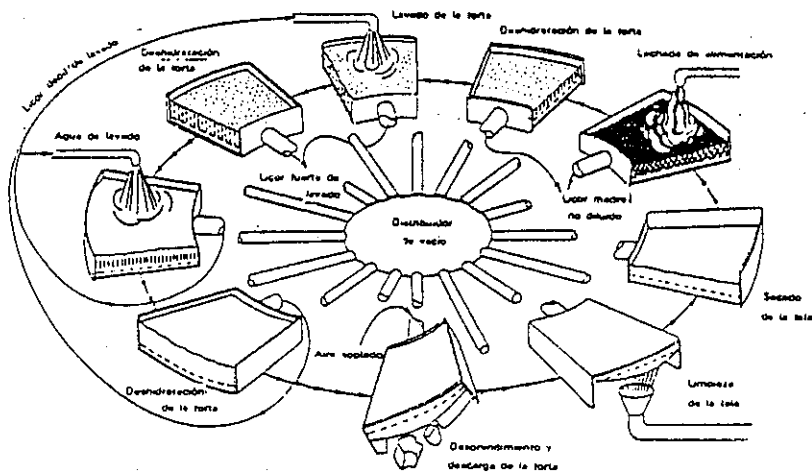
Tabla 5
Procesos en donde se utilizan los filtros horizontales rotatorios de vacío.

Alumina hidratada	Alumina trihidratada	Sílica gel
Sulfato de sodio	Sulfato de amonio	Cloruro de sodio
Carbon	Salas causticas	Cloruro de zinc
Pirita de cobre	Extractos	Sulfato de sodio (cristales)
Feldespató	Arena fundida	Fosfato trisódico
Sal de glauber	Magnetita	Ferrocianuro de sodio
Polvos metalicos	Glutamato monosodico	Concentrados de zinc
Acido fosforico	Concentrados de roca fosforica	Nitrato de potasio
polimeros	PVC	Etc. [9]

Dentro de los filtros horizontales de vacío tambien se incluyen :

- a) Filtros horizontales de mesa rectangular.
- b) Filtros horizontales rotatorios de bandeja inclinante.

Figura 6.8
Filtros horizontales de mesa recangular y rotatorio de bandeja inclinante.



7: DISEÑO DEL FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO DE VACÍO Y SU UTILIZACIÓN EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO

7.1 Generalidades

El ácido fosfórico (H_3PO_4) es uno de las mayores ácidos inorgánicos producidos en los Estados Unidos y el resto del mundo, y el segundo en términos de volumen (después del ácido sulfúrico) [16]. El consumo del ácido fosfórico en forma comercial es relativamente muy pequeño en comparación a su utilización como materia prima .

El ácido fosfórico siempre ha jugado un papel esencial en muchos fenómenos naturales, particularmente en la vida de los animales y las plantas. Con el incremento en la manufactura de fertilizantes artificiales, éste se convirtió en un factor comercial muy importante, de tal forma que ha desplazado en parte al ácido sulfúrico. [8]

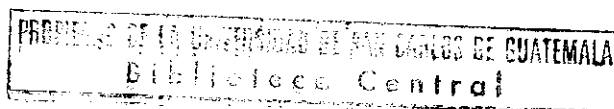
Su mayor utilización es el de servir como materia prima para la fabricación de sales (o fosfatos) siendo los fertilizantes su mayor área de producción [16].

El ácido fosfórico puede fabricarse por dos procesos; el proceso húmedo (o wet process) y el proceso térmico o del horno eléctrico. El ácido producido por el método húmedo es más barato , pero resulta bastante impuro; se utiliza principalmente en la fabricación de fertilizantes y en aquellos productos en donde la pureza no es importante.

El ácido producido en horno eléctrico es más puro, pero mucho más caro, y el empleo principal de éste ácido es para la fabricación de productos químicos que se utilizan en la industria alimenticia y en la industria de detergentes .

Los fosfatos producidos a partir del ácido fosforico son utilizados en las areas siguientes:

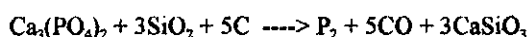
Fertilizantes	Tratamiento de agua
Detergentes sintéticos y limpiadores	Pastas dentales.
Alimentos para animales	Productos refractarios.
Comidas y bebidas	Curado de tocino y jamones.
Tratamiento metálico	Industria farmaceutica, etc. [16]



7.1.1 Proceso del horno eléctrico

El proceso del horno eléctrico se basa en el hecho de que la sílice tiene propiedades de ácido fuerte a temperaturas elevadas. En este proceso, roca fosfórica (fosfato tricalcico), carbón y sílice son alimentados a un horno eléctrico y la mezcla es calentada a 1550 °c. A esta temperatura, el carbón y la sílice reducen la roca fosfórica a fósforo elemental y monóxido de carbono, los cuales salen del horno como gases. [18]

La reacción principal que se lleva a cabo es la siguiente :



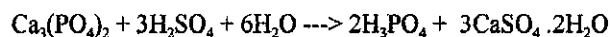
Posteriormente, los gases pasan a una torre en la cual, un rocío de agua condensa el fósforo en forma de líquido denso, el cual es enviado a un tanque de almacenaje. [6] Este fósforo es enviado a las áreas de consumo clave, en donde es convertido a ácido fosforico, por combustión del fósforo en una corriente de aire en exceso. Esto produce pentóxido de fósforo (P_2O_5), el cual es absorbido en agua para formar el ácido fosfórico. Este ácido fosfórico es de una alta pureza y puede utilizarse como grado USP (para consumo humano). [18]

7.1.2 Proceso húmedo (Wet Process)

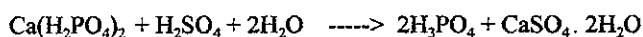
Este proceso consiste en la acidulación completa de la roca fosfórica (fosfato tricalcico) o superfosfato (fosfato monocalcico) , empleando un ácido fuerte, tal como ácido sulfúrico, ácido nítrico o ácido clorhídrico; sin embargo, generalmente se utiliza el ácido sulfúrico debido a su bajo costo y al hecho de que los productos de la reacción pueden separarse fácilmente por filtración. La utilización de los otros ácidos tiene el inconveniente de que los productos obtenidos son solubles, por lo que es necesaria una extracción con solventes orgánicos. Los israelitas utilizan ácido clorhídrico, pues lo obtienen en grandes cantidades como subproducto de las refinerías petroleras.

La reacción fundamental entre el ácido sulfúrico y la roca fosfórica es la siguiente:

a partir de la Roca fosfórica (fosfato tricalcico):



a partir de Superfosfato (fosfato monocalcico) :



Es importante comentar que tanto la roca fosfórica como el superfosfato, contienen impurezas como fluor, hierro, calcio y otras, que consumen una cantidad extra de ácido sulfúrico; por otra parte, la pureza del ácido sulfúrico no es fundamental; sin embargo, la roca fosfórica o el superfosfato no deben contener mucho fluor. [6]

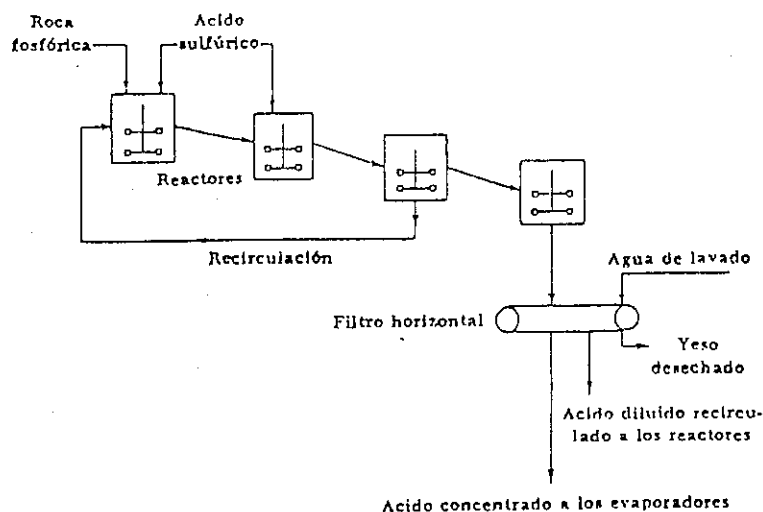
7.1.2.1 Objetivos de la reacción:

Un buen proceso para la fabricación de ácido fosfórico deberá extraer la máxima cantidad de P_2O_5 de la roca fosfórica, precipitar el sulfato de calcio de tal forma que filtre rápidamente y se lave con facilidad, y producir ácido fosfórico cuyo contenido de P_2O_5 sea lo más elevado posible. Un factor que es importante tomar en cuenta para evitar pérdidas de P_2O_5 , es la posible formación de una capa de sulfato de calcio insoluble en la superficie de la roca que evita el ataque completo de las partículas. Este efecto se origina al utilizar ácido concentrado, y generalmente se observa a concentraciones de ácido sulfúrico de 4 % o mayores. (concentración total dentro del reactor) [8]

La producción de ácido fosfórico por el proceso húmedo está controlada por el tamaño y la forma de los cristales de sulfato de calcio que se producen; es por ello que se han realizado diversas investigaciones para optimizar la cristalografía del sulfato de calcio, pues se pierde muchísimo P_2O_5 en la torta de filtrado dependiendo de la naturaleza del sulfato de calcio producido. Altas concentraciones de sulfato producirán conglomerados de sulfato de calcio en forma de agujas fáciles de filtrar pero difíciles de lavar. Las bajas concentraciones producen cristales rómbicos que son fáciles de filtrar y de lavar. A concentraciones muy bajas se producen cristales en forma plana o de láminas difíciles de filtrar y de lavar. En la práctica, los mejores cristales se obtienen a una concentración de sulfato de aproximadamente 2 - 4 %; afortunadamente, esto es también casi el óptimo para la descomposición de la roca y para disminuir las pérdidas de fofato en los cristales.

Figura 7.1

Diagrama de flujo típico de la fabricación del ácido fosfórico por el proceso húmedo (wet process)



De acuerdo con la fig. 7.1 , la alimentación a la planta consiste de roca fosfórica (malla 200) y ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico es diluido en un premezclador con los lavados del filtro de Sulfato de calcio (yeso) y cualquier otra solución recuperada que contenga P_2O_5 . La roca se mezcla primero con una suspensión de recirculación consistente de ácido fosfórico y yeso, la cual es separada en el último reactor antes de pasar al filtro.

Esta recirculación es muy importante para provocar la formación de sulfato de calcio fácilmente filtrable, ya que provee los núcleos para el crecimiento de los cristales y evita la formación de soluciones sobresaturadas de sulfato de calcio. Luego se añade el ácido sulfúrico y la mezcla de ácido, roca y sulfato de calcio de recirculación se hacen pasar a través de varios digestores (3 ó 4) agitados, en los cuales se da el tiempo necesario para la reacción manteniendo el sistema a una temperatura de 70 - 80 °c; como la reacción es exotérmica , se utiliza aire para mantener la temperatura de reacción constante. La suspensión del digestor final se filtra para obtener el ácido; por otra parte el yeso se filtra y generalmente se desecha. La filtración del yeso es una operación particularmente crítica puesto que esto afecta a las pérdidas de P_2O_5 en la torta del filtro. **Actualmente, la mayoría de las fábricas utiliza los filtros horizontales rotatorios de vacío (Pan - Filter), debido a que la pasta de yeso es muy pesada y esto hace que los filtros de tambor y de discos no sean muy eficientes para ésta separación.** Con este proceso, el rendimiento de producción del ácido fosfórico es de 95 % o más dependiendo de la calidad de la roca. [6]

El ácido obtenido por este proceso tiene una concentración del 30 - 32 % de P_2O_5 . Los factores que limitan la máxima concentración son :

- 1.- Los cristales de yeso precipitados de soluciones que contengan mas del 33 % de P_2O_5 son demasiado finos y muy difíciles de lavar.
- 2.- Los ácidos más concentrados necesitan menores temperaturas de operación, y los requerimientos de enfriamiento se hacen excesivos a temperaturas menores de 65 ° c .
- 3.- La viscosidad y la densidad del ácido concentrado se suman a los problemas de lavado y filtración.
- 4.- Los ácidos más concentrados limitan la cantidad de agua que puede utilizarse para el lavado de la torta filtrada, tendiendo a disminuir el rendimiento.

Por estas razones 30 - 32 % como P_2O_5 parece ser la más económica concentración, aunque hay procesos en los cuales se obtienen concentraciones mayores pero las condiciones de operación son más fuertes.

Posteriormente el ácido fosfórico es concentrado a 80 - 85 % por evaporación. [6]

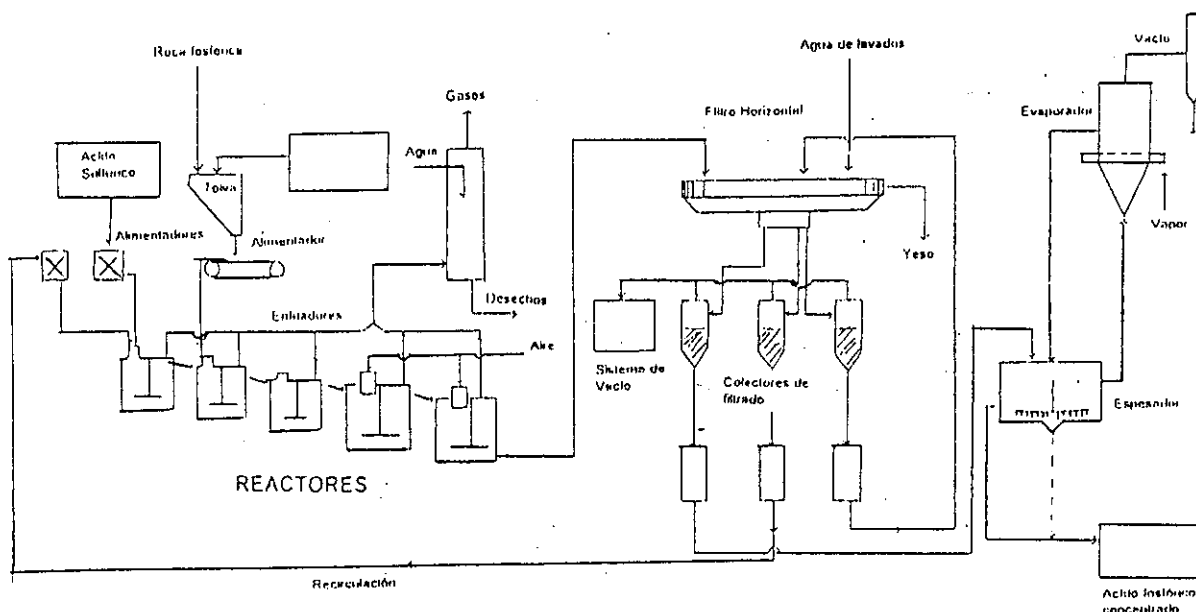
De todo el proceso que conlleva la producción del ácido fosfórico, se puede observar que la filtración es uno de los aspectos más importantes ya que de ésta depende el máximo rendimiento de la reacción; por otra parte, el éxito del proceso depende fundamentalmente tanto de la forma de cristal de yeso obtenido, como del tipo de filtro utilizado; aunque actualmente se utiliza el filtro horizontal rotatorio de vacío por ser el que más se adapta a éste proceso.

7.2 Balance de materiales y diseño del filtro :

El diseño del filtro horizontal rotatorio de vacío (Pan-Filter) se realizará utilizando las ecuaciones básicas de filtración, información de empresas fabricantes; así como de pruebas experimentales realizadas por medio del "test de hojas". El ácido fosfórico es fabricado por el proceso húmedo (wet- process) y se obtiene un ácido fosfórico que se puede utilizar muy bien como materia prima para la fabricación de fertilizantes y alimentos para animales.

El filtro horizontal rotatorio de vacío (Pan-Filter) se va a diseñar, para obtener 5.48 tm/hr de licor principal de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 31 % (equivalente a 1.7 tm/hr H_3PO_4 al 100 %)

Figura 7.2
Diagrama de flujo del proceso total de fabricación del ácido fosfórico



7.2.1 Balance de materiales en la sección de reactores:

De acuerdo con el proceso a utilizar y la literatura que existe sobre el tema, se puede asumir con bastante seguridad que la reacción tiene un 95 % de rendimiento; por otra parte la temperatura de la misma es de 65 - 70 °c.

Condiciones de entrada a los reactores :

SuperFosfato : 2.912 Tm / hr (El Superfosfato contiene 44.5% como P_2O_5)
 Acido Sulfúrico: 1.1529 Tm / hr (al 98 % en peso)
 Agua: 1.4739 Tm / hr (para diluir el Acido Sulfúrico)
 Sol. H_3PO_4 al 20% : 7.576 Tm / hr (como medio de dilución de la materia prima y para mejorar el crecimiento de los cristales de yeso).

La determinación de la cantidad de solución de H_3PO_4 al 20 % se realizó de la siguiente forma:

Se requiere que el H_3PO_4 final esté al 31 % en peso, se tiene entonces:

$$\left[(1.7 \text{ tm } H_3PO_4 + H_3PO_4 \text{ agregado}) / (1.7 \text{ tm } H_3PO_4 + H_3PO_4 \text{ agregado} + \text{agua agregada} + 1.095 \text{ tm } H_2O(\text{dilución sulfurico})) \right] * 100 = 31 \%$$

La cantidad de H_2O que realmente se utiliza para diluir el H_2SO_4 es de 1.4739 tm/hr; sin embargo, hay que restar el agua que se convierte en agua de hidratación del yeso que se produce (0.4027 tm/hr) y tomar en cuenta el agua que contiene el H_2SO_4 (2 %); por lo que se obtiene 1.095 tm/hr H_2O neto.

se define X = tm / hr de Sol. de H_3PO_4 al 20 % agregado como medio de dilución.
 sustituyendo " X " en la ec. anterior se tiene :

$$(1.7 + 0.2 * X) / (1.7 + 0.2 * X + 0.8 * X + 1.095) * 100 = 31 \%$$

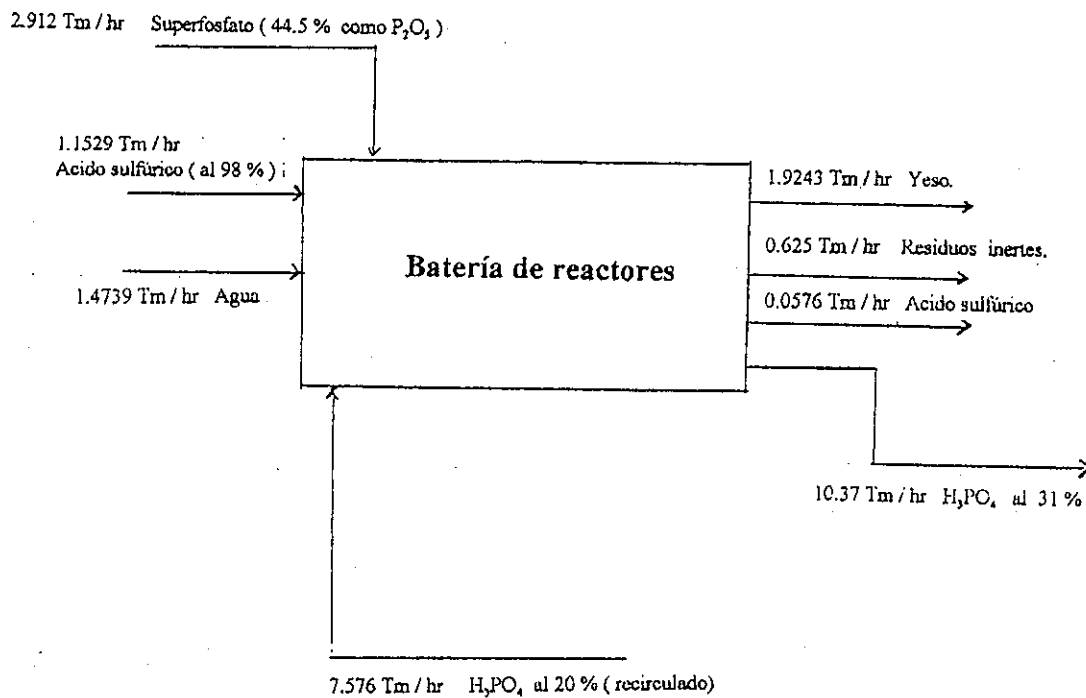
de donde $X = 7.576 \text{ tm/hr } H_3PO_4 \text{ al } 20 \%$

Condiciones de Salida en los reactores:

La suspensión que sale de los reactores tiene la siguiente composición:

Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$):	1.9243 Tm / hr
Residuos inertes:	0.625 Tm / hr (residuos del superfosfato que no reaccionan)
Acido fosfórico (al 100 %):	3.210 Tm / hr (incluye el ácido fosfórico que se produce, así como el que se utilizó como medio de dilución.)
Agua:	7.155 Tm / hr
H_2SO_4 que no reaccionó:	0.0576 tm / hr.

Fig. 7.3
Balance de materiales en la sección de reactores.



7.2.2 Balance de materiales en la sección de filtración:

Las condiciones de operación del filtro horizontal son : $\Delta P = 15$ " Hg (presión de vacío), temperatura de entrada de la suspensión = 65 - 70 °c.

Condiciones de entrada de la suspensión al filtro

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	=	1.924 tm / hr
Impurezas del superfosfato	=	0.625 tm / hr
H_2SO_4 que no reaccionó	=	0.057 tm / hr
Solución de H_3PO_4 al 31 %	=	10.37 tm / hr
(H_3PO_4 al 100 % = 3.215 tm/hr)		
(Agua = 7.155 tm/hr)		

Condiciones de salida de la torta filtrada

Sólidos: (yeso + impurezas)	=	2.549 tm/hr
Licor principal de H_3PO_4	=	(sol. H_3PO_4 total - sol. H_3PO_4 retenida en la tórta)
	=	(10.37 - Y) tm/hr
H_2SO_4 que no reacciona	=	0.057 tm / hr.

Cálculo de la solución de H_3PO_4 retenida en la torta filtrada (Y)

De acuerdo con las pruebas realizadas en el "test de hojas" (ver anexo), la humedad final de la torta obtenida a una $\Delta P = 15$ " Hg fué de 56.8 %.

Utilizando este valor se tiene que :

$$\begin{aligned} \text{Peso de torta descargada / hr} &= 2.549 \text{ tm/hr de sólidos} / (1 - 0.568) &= 5.9 \text{ tm/hr} \\ \text{Solución de } \text{H}_3\text{PO}_4 \text{ al 31 \% retenido en la torta} &= 5.90 \text{ tm / hr} * 0.568 &= 3.35 \text{ tm/hr} \end{aligned}$$

$$\text{Por lo tanto, el licor principal recolectado} = 10.37 \text{ tm / hr} - 3.35 \text{ tm / hr} = 7.02 \text{ tm/hr}$$

Lavados de la torta

El lavado de la torta filtrada básicamente será un lavado por desplazamiento, con lo cual se puede recuperar el 90 % del H_3PO_4 retenido en la torta. La cantidad necesaria para el lavado por desplazamiento es igual a la cantidad

de solución de H_3PO_4 retenido en la torta, en este caso se utilizará un 25 % más de agua para recuperar otro 3 %, por lo que el total de H_3PO_4 a recuperar será del 93 %.

H_3PO_4

H_2O necesaria para el lavado por desplazamiento = H_3PO_4 retenido en la torta = $3.35 * 1.25 = 4.19$ tm/hr

El H_3PO_4 recuperado en los lavados es = $3.35 * 0.93 = 3.115$ tm/hr.

Solución de H_3PO_4 recirculada a los reactores:

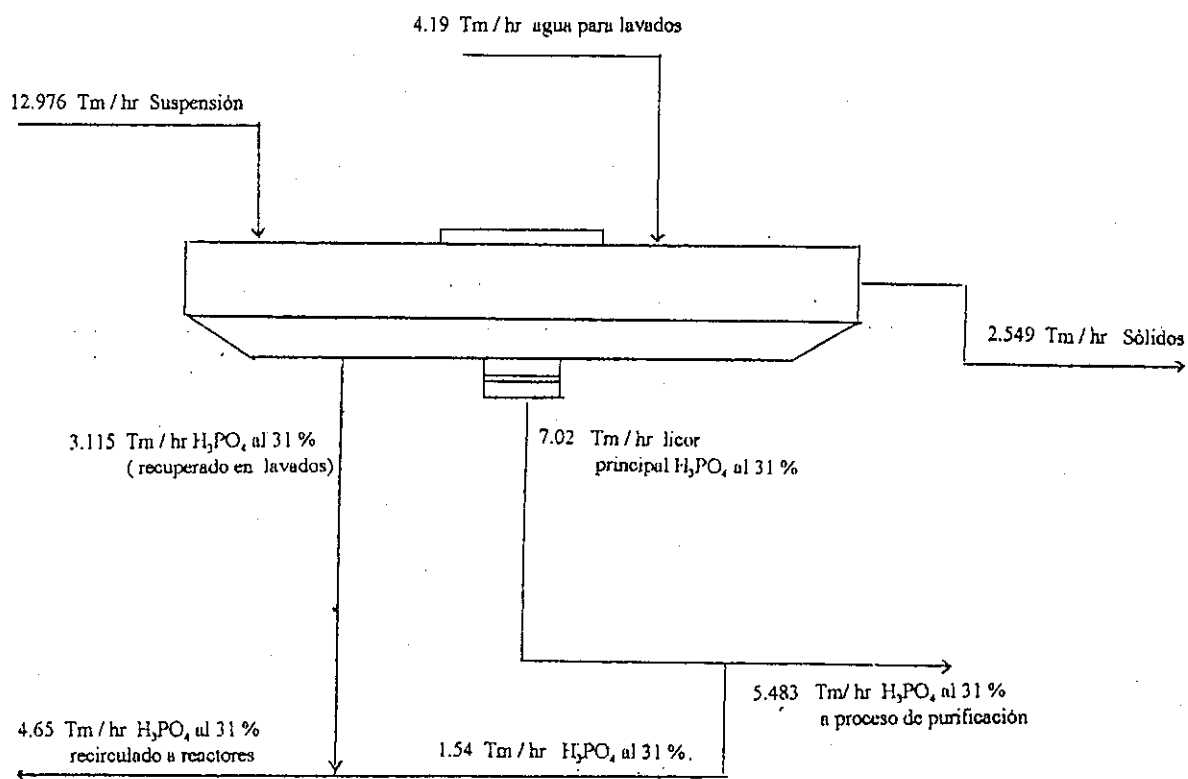
Licor principal de H_3PO_4 al 31 % que sale del filtro horizontal = 7.02 tm/hr

Producción requerida de H_3PO_4 al 31 % = 5.483 tm/hr

por lo tanto la cantidad de H_3PO_4 al 31 % que es recirculada a los reactores es de:

$$3.115 \text{ tm/hr} + (7.02 \text{ tm/hr} - 5.48 \text{ tm/hr}) = 4.65 \text{ tm/hr}$$

Figura 7.4
Balance general del proceso de filtración



7.3 Determinación del área de filtración

Para el cálculo del area de filtración en proceso continuo se utiliza principalmente la ecuación (6)

$$Mc/A_t = \left[\left[\frac{2C \alpha \Delta P (g_c) f n}{\mu} + (n^* R_m)^2 \right]^{1/2} - n^* R_m \right] / \alpha \quad (6)$$

en donde:

Mc	=	Velocidad de producción de sólidos: (lb/seg)
A _t	=	Área total del filtro continuo (Pie ²)
C	=	masa de partículas depositadas en el filtro por unidad de volumen de filtrado: (lb / pie ³)
α	=	Resistencia específica de torta (pie /lb)
ΔP	=	Presión de operación del filtro rotatorio.
g _c	=	32.174 pie-lb/lb _r -S ²
R _m	=	Resistencia del medio filtrante: (Pie ⁻¹)
μ	=	Viscosidad del filtrado a la temperatura de operación del filtro (lb / pie.seg)
f	=	Fracción del filtro utilizado para la filtración del licor madre.
n	=	Velocidad de giro (o rotación) del filtro (1/ seg) ó (rev/seg)

La resistencia específica de la torta (α) y la resistencia del medio filtrante (R_m) se pueden obtener en base a pruebas experimentales y utilizando las ecuaciones siguientes :

$$\alpha = (A^2 \Delta P^* g_c^* K_c) / (C \mu) \quad (7)$$

$$R_m = A^* \Delta P^* g_c (1/q_o) \quad (8)$$

A	=	Área de filtro utilizado en las pruebas experimentales (pie ²)
K _c	=	Constante.
(1/q _o)	=	Constante.

El cálculo de las constantes se realiza en base a la ecuación (4)

$$(t/V) = (K_v/2) * V + 1/q_o \quad (4)$$

la cual se obtiene por medio del test de hojas, en donde se mide el volumen de filtrado recolectado

en función del tiempo a diferentes niveles de presión; y posteriormente, se correlaciona (t/V) ó (tiempo/ vol. recolectado) vrs V ó (volumen recolectado) y se obtiene una ec. de regresión con pendiente = $(K_c/2)$ e intercepto = $1/q_0$. Los resultados de las pruebas experimentales se presentan en el anexo.

Las constantes obtenidas de la ecuación (4) a diferentes niveles de presión (ver anexo) se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6

ΔP ($^{\circ}$ Hg)	(lb / pie ²)	$K_c / 2$ (seg / pie ⁶)	$1/q_0$ (seg / pie ³)
5	353.73	2244505.4	4954.72
7	495.224	1282562.6	3869.50
15	1061.20	4168320.9	2077.30

se tiene que :

$$A = 0.068477 \text{ pie}^2$$

$$\mu = 1.2686 \text{ Cstks} = 1.0679955\text{E}3 \text{ lb/ pie} \cdot \text{seg} \text{ (viscosidad del filtrado a } 70 \text{ }^{\circ}\text{c)}$$

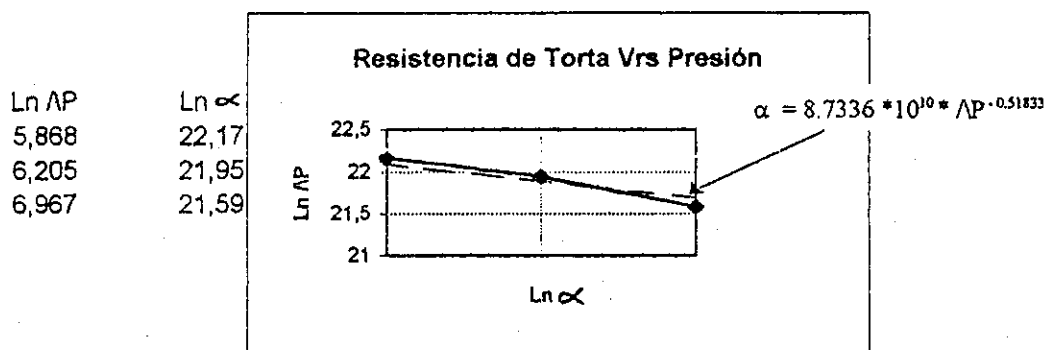
$$C = 26.356 \text{ lb / pie}^3 \text{ (ver cálculo en el anexo)}$$

El cálculo de las resistencias de torta y medio filtrante a las diferentes presiones, utilizando las ec. (7) y (8) se resumen en la tabla abajo.

Tabla 7

ΔP lb/pie ²	α (pie/lb)	R_m (Pie-1)
353.73	4.2554 E9	3.6155E9
495.224	3.4042 E9	3.9531E9
1061.20	2.3708 E9	4.5475E9

Figura 7.5
Correlación entre $\ln \Delta P$ Vrs $\ln \alpha$



Con los datos de la figura 7.6 se puede obtener la resistencia de la torta a diferentes presiones de operación; por otra parte, la pendiente que se obtiene de la ecuación de correlación entre $\ln \alpha$ y $\ln \Delta P$ define lo que se llama "coeficiente de compresibilidad (S)" y este valor generalmente está entre 0 - 1. si "S" es cero, la torta es incompresible, mientras que si "S" = 1, la torta es completamente compresible [4]. Para el presente caso, el valor de "S" es 0.52; es decir, una torta medianamente compresible.

Conociendo los datos de α y de R_m , se calcula el área de filtración utilizando la ecuación (6). Los datos por utilizar son :

ΔP	= 1061.2 lb/ pie ² (15 " Hg de vacío)
g_c	= 32.174 pie.lb/ lbf. S ²
f	= (1/3)
n	= (1/180) rev/seg. = 0.333 rpm.
μ	= 1.0679955E ⁻³ pie/lb.seg (viscosidad del filtrado a 70 °c)
α	= 2.370849 E ⁹ pie/lb.
R_m	= 4.5475 E ⁹ (1/pie)
C	= 26.356 lb solido / pie ³ de filtrado.

Los valores de "f" y de "n", son datos de diseño para los filtros horizontales de vacío[8]

De la ecuación (6):

$$(Mc/At) = [(7.39862 E^{15} + 6.382641 E^{14})^{1/2} - 2.526388 E7] / 2.370849 E^9$$

$$At = Mc / 0.027157$$

Cantidad de sólidos que ingresa al filtro : 2.5493 tm/ hr = Mc = 1.5579 lbs / seg.
 $At = (1.5579 \text{ lb/seg}) / (0.027157)$

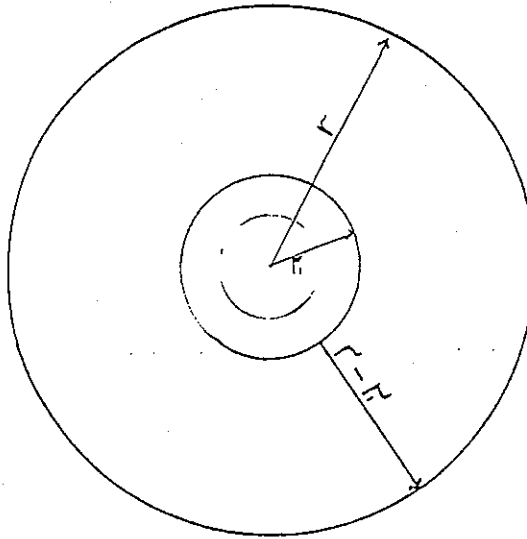
$$At = 57.40 \text{ pie}^2$$

Se asume un factor de corrección del 15 %

$$\text{Área total de filtración} = 57.40 * 1.15 = 66 \text{ pie}^2$$

7.3.1 Diametro del filtro:

Figura 7.6



$$\text{Área total de filtración} = At = \pi * (r^2 - r_1^2) \quad (9)$$

r = radio Externo

r₁ = radio interno.

$$r^2 = (A / \pi) + r_1^2$$

Se asigna al radio interno un valor de r₁² = 2.0 pies (Dato de diseño de fabricantes [9])

$$r = [(66 / \pi) + (2.0)^2]^{1/2} = 5.00 \text{ pies}$$

Diametro del filtro = 10.0 pies = 3.00 mts.

7.4 Espesor de la suspensión que ingresa al filtro

La suspensión al momento de ingresar al filtro formará una capa de un espesor determinado; a medida que la filtración avanza, el espesor disminuye debido al licor que está siendo filtrado, de tal forma que al momento de la descarga la torta final tendrá un espesor menor al de la suspensión inicial. Debido a que el proceso es continuo, no debe haber acumulación de suspensión en el proceso pues de lo contrario el sistema completo se descontrolaría. Para que el sistema se mantenga en equilibrio, la cantidad de suspensión a filtrar por hora debe ser igual a la cantidad total de reactivos que ingresan al primer reactor por hora, y aquí es donde el espesor de la suspensión en el filtro y la velocidad de rotación del filtro son claves para tener un sistema bajo control.

El espesor de la suspensión en filtro se calcula por:

$$V = \varepsilon * [\pi (r^2 - r_1^2)] \quad (10)$$

en donde ε = espesor de la suspensión en el filtro, y V = volumen de la misma.

De la Ec. (9)

$$V = \pi * A_f$$

en donde A_f = área total de filtración.

$$\text{Volumen de Suspensión} = \text{Masa susp./ densidad suspensión.} \quad (11)$$

La cantidad total de suspensión que sale de los reactores al filtro es de 12.976 tm/ hr.

La densidad de ésta suspensión a 65 °c es (medida experimentalmente) = 1.2713 tm/m³

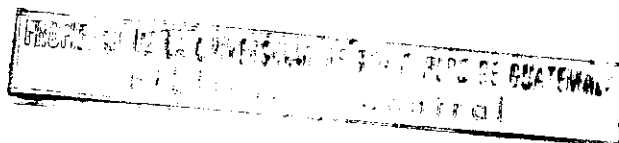
$$V \text{ suspensión} = 12.976 / 1.2713 = 9.882 \text{ mt}^3 / \text{hr} = 0.170 \text{ mt}^3 / \text{min.}$$

Como el filtro gira a una vel. de 0.33 rev/min, en una revolución, la cantidad de suspensión alimentada a él es de $0.170 * 3 = 0.510 \text{ mt}^3 / \text{ciclo} = 18.0 \text{ pie}^3 / \text{ciclo}$. Con estos datos, el espesor mínimo (para que no haya acumulación) de la suspensión de alimentación al filtro es:

$$\varepsilon = V / A_f$$

$$\varepsilon = 17.45 \text{ pie}^3 / 66.0 \text{ pie}^2 = 0.273 \text{ pies}$$

$$\varepsilon = 3.27 \text{ pulg.} = 8.3 \text{ cms.}$$



De acuerdo con las pruebas experimentales (ver anexo) , para una $\Delta P = 15$ " Hg (presión de operación del filtro), la relación entre espesor inicial y espesor final de suspensión y torta filtrada es:

$$e_f = 0.44827 * e_i$$

e_f = espesor final de torta filtrada.

e_i = espesor inicial de la suspensión alimentada al filtro.

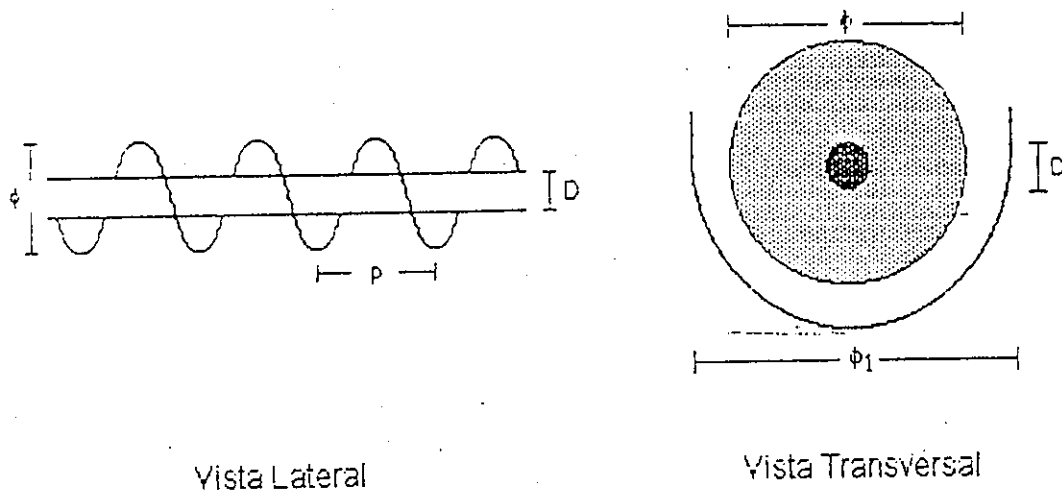
Por lo tanto, el espesor final que tendrá la torta filtrada será:

$$e_f = 0.44827 * 3.27 = 1.46 \text{ pulg.} = 3.72 \text{ cms.}$$

7.5 Diseño del tornillo transportador para la descarga de la torta.

En el diseño del sistema de descarga , el cálculo principal es el de la velocidad (rpm) a la cual debe girar el tornillo transportador para retirar la torta filtrada , de tal forma que ésta no se acumule en el filtro.

Figura 7.7
Diagrama del tornillo transportador y sus partes.



la velocidad de giro del tornillo transportador se calcula por la ecuación (12)

$$\text{Velocidad de giro (rpm)} = 4Q / [\pi (\phi_1 - D^2) P * f * 60 * \rho] \quad (12)$$

$$d = [D^2 + (p / \pi)^2]^{1/2} \quad (13)$$

$$\phi = \phi_1 - D + d \quad (14)$$

Q	= Cantidad de torta a descargar / hora	= 12,980 lbs/ hr
ϕ_1	= Diámetro de la canaleta.	= 18 pulgadas (dato de diseño)
D	= Diámetro del eje del tornillo	= 1 pulgada (dato de diseño)
P	= Longitud de paso	= 6 pulgadas (dato de diseño)
ρ	= Densidad de la torta	= 0.041 lbs / pulg ³
d	= Diámetro interno de las aletas	
ϕ	= Diámetro externo de las aletas.	
f	= Fracción de llenado.	

Se asume que el 40 % del canal es ocupado por la torta y que la longitud del eje del tornillo es de 1.50 mts. que es igual al radio del filtro. Sustituyendo valores conocidos en las ecuaciones se tiene:

$$\text{Vel. de rotación (ec. 10)} = 9 \text{ rpm}$$

$$d \text{ (ec.11)} = 2.16 \text{ pulg.}$$

$$\phi \text{ (ec 12)} = 19.16 \text{ pulg.}$$

7.6 Diseño de la válvula automática

De acuerdo con el proceso de filtración del ácido fosfórico, la torta de sulfato de calcio (yeso) retiene mucho liquido por lo que para obtener la máxima recuperación de ácido deben realizarse varios lavados a contracorriente; obviamente hay un límite de lavados pues también es importante tomar en cuenta los costos de instalación de bombas para cada lavado.

Para el presente caso, se diseñará la válvula automática para que tenga capacidad de realizar 2 - 3 lavados a contracorriente, lo cual es lo común en el diseño de filtros horizontales de vacío. Los datos de diseño para la válvula automática son :

Cantidad de lavados	3
Compartimientos de filtrado y lavado	3
Diámetro de la válvula	1.5 pie.

Diámetro plato perforado	1.5 pies
Diámetro de tuberías conductoras del líquido filtrado:	1.5 pulg.
Cantidad de compartimentos en el filtro	20
Altura del cuerpo principal	10 pulg.

7.7 Materiales de construcción del filtro

El material de construcción del filtro horizontal rotatorio de vacío va a depender de las condiciones de operación y del producto que se vaya a filtrar; de tal forma que puede utilizarse acero inoxidable, metales recubiertos con caucho, o materiales sintéticos como por ejemplo fibra de vidrio.

Para el presente caso, se puede utilizar en muy buena forma la fibra de vidrio, ya que la temperatura de operación no sobrepasa los 70 °c y el filtrado que en este caso es el ácido fosfórico, es un ácido ligeramente corrosivo; con lo cual el costo del equipo no se eleva demasiado. Las tuberías que llevan a la válvula automática pueden ser de caucho, acero inoxidable, CPVC o fibra de vidrio; la válvula automática puede ser de acero inoxidable ó fibra de vidrio y para la construcción del tornillo transportador puede utilizarse la fibra de vidrio. La tela filtrante que más se adecua al proceso es el polipropileno.

CONCLUSIONES

- 1.- El filtro horizontal rotatorio de vacío (Pan - Filter) es el equipo de filtración al vacío más eficaz para la recuperación del licor filtrado, debido a que la torta se puede inundar con líquido de lavado, y cuando éste es realizado a contracorriente, el licor no saldrá muy diluido; además a diferencia de los otros equipos de filtración, el espesor de la suspensión puede ser elegido en forma arbitraria ayudando con ello a que el filtro diseñado no sea muy grande; con lo cual, el costo del mismo puede ser reducido.
- 2.- El diseño de los filtros horizontales rotatorios de vacío se determina fundamentalmente con las pruebas experimentales a escala , y aunque éstas son sencillas, su importancia es clave para que el equipo funcione muy cerca de las condiciones reales de operación. La experiencia es otro factor clave en el diseño. Además, su construcción no requiere de tecnología y equipo sofisticado, y puede realizarse localmente; con ello el costo del mismo se reduce muchísimo si se compara con un equipo similar, adquirido en el extranjero. Obviamente, se modificarán algunas condiciones al momento de implementarlo al proceso industrial.
- 3.- Las empresas dedicadas a la fabricación de productos químicos serán beneficiadas al implementar un departamento de investigación y desarrollo, ya que podrán explotar muchos de los recursos que nuestro país posee y que actualmente muy pocas empresas realizan.

RECOMENDACIONES

- 1.- Se debe promover el diseño e implementación tanto de equipo, como de procesos químicos dentro de la industria nacional, utilizando para ello el potencial que posee el ingeniero químico, pues es la persona que tiene la preparación y la versatilidad adecuada. Ello hará que con el tiempo se dependa menos de países industrializados y a la vez el costo de los equipos podrá ser reducido

- 2.- La filtración al vacío es un tema que no ha sido tratado a profundidad a pesar de ser una operación unitaria muy importante, por lo que se debe continuar con su estudio para conocer más a fondo los aspectos que no se trataron en ésta tesis, como por ejemplo el diseño del sistema de vacío, ya que este es fundamental para que los filtros de vacío operen a las condiciones requeridas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- 1.- Robert Perry / Cecil Chilton, Biblioteca del ingeniero químico, (5ta. edición; vol. 5, McGraw - Hill Mexico: 1972), pp. 66 a 70 , 87 a -93
- 2.- Svarovsky, Ladislav, Solid - liquid separation., (Butterworth & Co.; London: 1977), pp. 170 - 175, 222 - 235 , 284 - 290
- 3.- Frank Tiller / J. E. Flood, Chemical engineering magazine., (Mcgraw - Hill; june 20 1966 U.S.A.), pp. 163-165, 170 - 172, 176 - 180
- 4.- Warren L. McCabe / Julian C. Smith, Operaciones básicas de ingeniería química. (4ta.edición, McGraw - Hill; Mexico: 1985), pp 997 - 1023
- 5.- Christie J. Jeankoplis, Procesos de transporte y operaciones unitarias (The Ohio State university; Compañía editorial continental s.a. de c.v. (C.E.C.S.A.), Mexico: 1982), pp 648- 650, 653-659
- 6.- Richard M. Stephenson, Introducción a los procesos químicos industriales. (Compañía editorial continental s.a de c.v.; Mexico: 1979), pp 181 - 195
- 7.- Stauffer Chemical Company, Manual de staufer (boletin, Westport, Connecticut 06881 1981)
- 8.- Waggaman, William Henry, Phosphoric acid, phosphates and phosphatic fertilizers., (2da. ed., Reinohold Publications Corp., New York: 1952), . 180 -201
- 9.- Dorr - Oliver Incorporated. (boletin HRF-1. 1990. 612 wheeler's Farm Road. Milford, CT06460-8719 USA. Fax. (203) 876-5432)
- 10.- Wills B. A., Tecnología de procesamiento de minerales., (1era. edición; editorial Limusa s.a. de c.v., Mexico: 1987)
- 11.- Charles Fuhrmeister, Jr., Maplewood., U.S.A Patent 2 588976 (March 11, 1952, To Oliver united Filters Incorporated); patente de invención
- 12.- Catalog 5BO. EIMCO. Salt Lake Utah. Automatic filter valve, (boletin)
- 13.- Arthur Wright, M.E., Industrial filtration., (vol. 1, The chemical catalog company Inc. 1923), pp 205 - 208
- 14.- Edwin Letts Oliver, U.S.A. Patent 1335 695 (March 30 , 1920), patente de invención

- 15.- Alan S. Foust, Principios de operaciones unitarias, (2da. Edición, Compañía editorial continental s.a. de c.v. (C.E.C.S.A; Mexico: 1987), pp 661 - 663
- 16.- Kirk Raymond / Donald F. Othmer, Encyclopedia of chemical technology, (3ra. ed., John Wiley & sons; New York: 1983), pp
- 17.- Chemical abstracts. Published by American Chemical Society. The Ohio state university; Columbus Ohio.
- 18.- Institution of chemical engineers, The scaling - up of chemical plant and processes: symposium, (London: 28 - 29 may 1957; London Author), pp S121 - S25
- 19.- Guthrie, Andrew , Vacuum technology, (Jhon Willey & sons ; New york : 1963), pp 2, 11, 26, 38, 43, 49-59, 412-415

ANEXO

Resultados de las pruebas experimentales realizadas para el diseño del filtro horizontal rotatorio de vacío

Las pruebas experimentales se realizaron en base al test de hojas, utilizando un embudo buchner y una bomba de vacío de laboratorio. Se realizaron corridas a diferentes niveles de vacío. Las condiciones y parámetros utilizados para esta prueba fueron las siguientes:

Área de filtración del embudo buchner : 0.068477 pie² (29.5 cms de diámetro)
 Niveles de vacío utilizados (ΔP) 5 "Hg, 7 "Hg, 15 " Hg.
 Temperatura de la suspensión: 65 - 70 ° c.

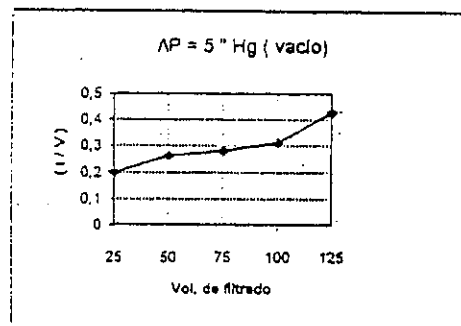
Se realizaron corridas a diferentes niveles de vacío entre volumen de filtrado Vrs. tiempo. Con estos datos se obtuvieron las correlaciones respectivas a las diferentes presiones, y con ellas obtener los valores de Kc y de q₀.

Las ecuaciones lineales que se obtienen son de la forma $(t/v) = (Kc/2) + 1/q_0$. Los resultados obtenidos, se presentan en las siguientes tablas

TABLA 8

 $\Delta P = 5''$ Hg:

V(mls)	t (seg)	t / V (seg / mls)
25	5	0.20
50	13	0.26
75	21	0.28
100	31	0.31
125	54	0.43



Espesor inicial de la suspensión: 2.55 cms

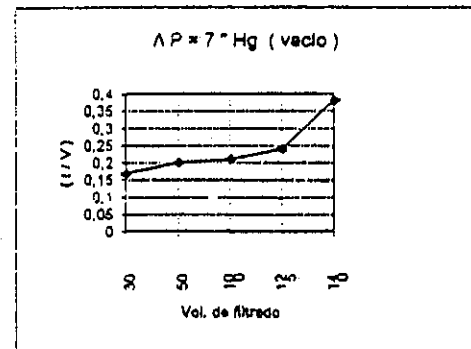
Espesor final de la torta: 1.75 cms.

Ecuación correlacionada obtenida: $(t/V) = 0.0014 * V + 0.175$

TABLA 9

 $\Delta P = 7'' \text{ Hg}$

V (mls)	t (seg)	t / v (seg / mls)
25	5	0.20
50	10	0.20
100	21	0.21
125	30	0.24
140	53	0.37



Espesor inicial de la suspensión: 2.7 cms.

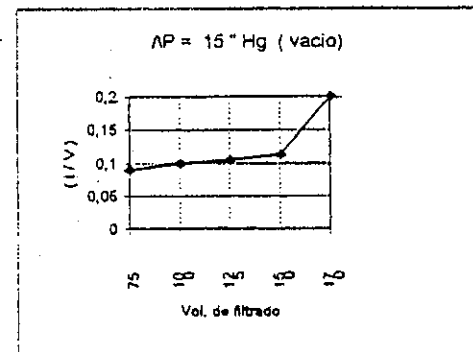
Espesor final de la torta: 1.6 cms

Ecuación de correlacion obtenida: $(t/V) = 0.0008(V) + 0.136667$

TABLA 10

 $\Delta P = 15'' \text{ Hg}$

V (mls)	t (seg)	t / v (seg / mls)
75	7	0.09
100	10	0.10
125	13	0.10
150	17	0.11
170	35	0.21



Espesor inicial de la suspensión: 2.9 cms

Espesor final de la torta: 1.3 cms.

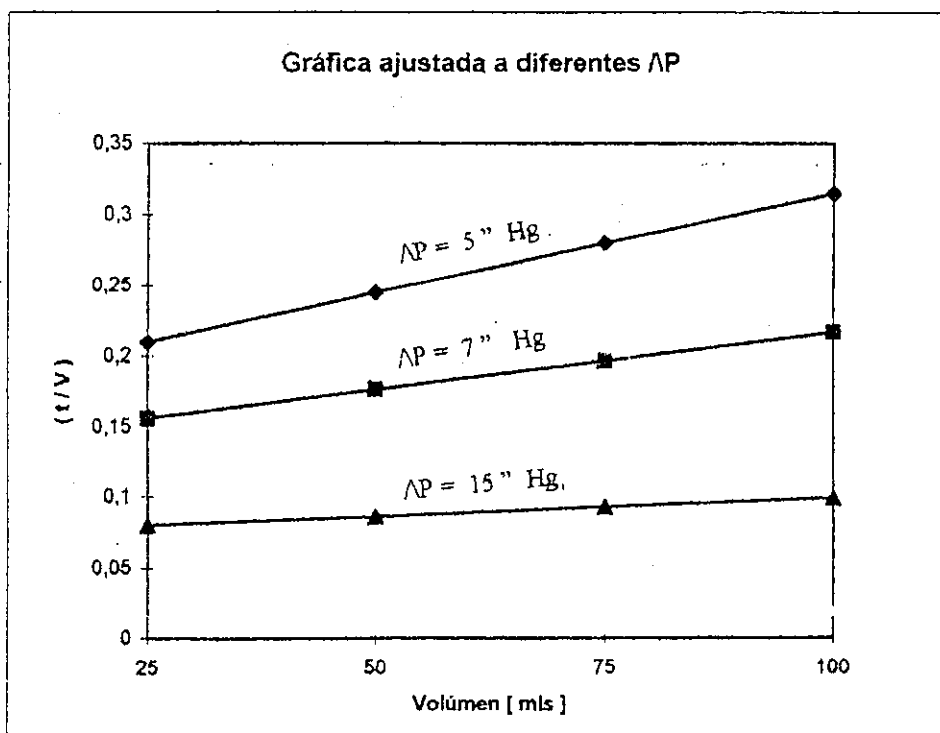
Ecuacion correlacionada obtenida: $(t/V) = 0.00026(V) + 0.07337$

TABLA 11

Datos ajustados para V vrs (t/V) a las diferentes presiones de vacío utilizando las ecuaciones de correlación respectivas.

Volúmen (mls)	$\Delta P = 5''$ Hg (t/V) (seg/ mls)	$\Delta P = 7''$ Hg (t/V) (seg/ mls)	$\Delta P = 15''$ Hg (t/V) (seg/ mls)
25	0.210	0.1567	0.0798
50	0.245	0.1767	0.0864
75	0.280	0.1967	0.0929
100	0.315	0.2167	0.0994

Gráfica de las 3 corridas correspondientes a la tabla 11



Sustituyendo datos en la ecuación (A) :

$$C = 18.30 / \{1 - [(2.315 - 1)] * (18.30 / 76.116)\} = 26.76 \text{ lbs / pie}^3$$