

BOMBAS Y SUS APLICACIONES

MATERIA: Equipos Mecánicos

SEMESTRE: 6°

Tuxtla Gutiérrez Chiapas, a 30 de Septiembre del 2004.

INDICE PÁGINA

INTRODUCCIÓN - - - - - 1

DIAGRAMA DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS - - 5

CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS - - - - - 6

CARACTERÍSTICAS DE RENDIMIENTO Y DE

SELECCIÓN DE LA BOMBA - - - - - 8

SELECCIÓN DE BOMBAS - - - - - 18

CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS - - - - - 21

BOMBA DE POTENCIA - - - - - 23

BOMBA DE VAPOR - - - - - 24

BOMBA CENTRÍFUGA - - - - - 27

BOMBA DE DESPLAZAMIENTO NO POSITIVO - - - 31

BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO - - - - 32

BOMBA DE CAUDAL VARIABLE - - - - - 35

BOMBAS MÚLTIPLES - - - - - 35

BOMBAS OSCILANTES - - - - - 36

BOMBAS ROTATIVAS - - - - - 37

- BOMBAS DE ENGRANAJES EXTERNOS - - - 37
- BOMBAS DE LÓBULOS - - - - - 39
- BOMBAS DE HUSILLOS - - - - - 39
- BOMBAS DE ENGRANAJES INTERNOS - - - 40
- BOMBAS DE SEMILUNA - - - - - 40
- BOMBAS GEROTOR - - - - - 41

INDICE PÁGINA

• BOMBAS DE PALETAS – – – – –	41
• NO COMPENSADAS – – – – –	42
• COMPENSADAS – – – – –	42
• FIJAS – – – – –	43
• BOMBAS DE PISTONES – – – – –	43
♦ AXIALES – – – – –	44
♦ AXIALES EN LINEA – – – – –	44
♦ AXIALES EN ÁNGULO – – – – –	45
♦ CON PLACA OSCILANTE – – – – –	46
♦ RADIALES – – – – –	46
 BOMBAS RECIPROCANTES – – – – –	47
 BOMBA DE DIAFRAGMA – – – – –	48
 BOMBA DE EMBOLO – – – – –	49
 BOMBA RECIPROCANTE DE EMBOLO DE	
DESCARGA VARIABLE – – – – –	51
 BOMBAS ROTATORIAS – – – – –	52
 BOMBAS LOBULARES – – – – –	54
 BOMBAS ESPECIALES – – – – –	54
 BOMBAS ESPECIALES UTILIZADAS EN AVIACIÓN – – –	55
 BIBLIOGRAFÍA – – – – –	60

INTRODUCCIÓN

Las primeras bombas de las que se tiene conocimiento, son conocidas de diversas formas, dependiendo de la manera en que se registró su descripción, como las ruedas persas, ruedas de agua o norias. Todos estos dispositivos eran ruedas bajo el agua que contenían cubetas que se llenaban con agua cuando se sumergían en una corriente y que automáticamente se vaciaban en un colector a medida que se llevaban al punto más alto de la rueda en movimiento. La existencia, en algunas partes de Oriente, de ruedas semejantes ha continuado aun dentro del siglo veinte.

La mas conocida de aquellas bombas, el tornillo de Arquímedes, aun persiste en los tiempos modernos. Todavía se manufactura para aplicaciones de baja carga, en donde el líquido se carga con basura u otros sólidos.

Sin embargo, es probablemente más interesante el hecho con todo el desarrollo tecnológico que ha ocurrido desde los tiempos antiguos, incluyendo la transformación de la potencia del agua en otra formas de energía, hasta la fisión nuclear, la bomba queda probablemente como la segunda máquina de uso más común, excedida apenas por el motor eléctrico.

Puesto que las bombas han existido por tanto tiempo y su uso está tan extendido, no es de

sorprenderse que se produzcan en una infinidad de variedades de tamaños y tipos y que se apliquen también a una infinidad de servicios. Proporcionando un trabajo comprensible de algunos tipos de estas bombas.

Siempre que tratemos temas como procesos químicos, y de cualquier circulación de fluidos estamos, de alguna manera entrando en el tema de bombas.

El funcionamiento en si de la bomba será el de un convertidor de energía, o sea, transformara la energía mecánica en energía cinética, generando presión y velocidad en el fluido.

Los factores más importantes que permiten escoger un sistema de bombeo adecuado son: presión última, presión de proceso, velocidad de bombeo, tipo de gases a bombear (la eficiencia de cada bomba varía según el tipo de gas).

Un equipo de bombeo es un transformador de energía, mecánica que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc. Y la convierte en energía, que un fluido adquiere en forma de presión, de posición y de velocidad.

Así se tendrán bombas que funcionen para cambiar la posición de un cierto fluido. Por ejemplo la bomba de pozo profundo, que adiciona energía para que el agua del sub-suelo se eleve a la superficie.

Un ejemplo de bombas que adicionan energía de presión sería una bomba en un oleoducto, en donde las cotas de altura así como los diámetros de tuberías y consecuentemente las velocidades fuesen iguales, en tanto que la presión fuesen iguales, en tanto que la presión fuese incrementada para poder vencer las perdidas de fricción que se tuviesen en la conducción.

Existen bombas que trabajan con presiones y alturas iguales que únicamente adicionan energía de velocidad. Sin embargo a este respecto hay muchas confusiones en los términos presión y velocidad por la acepción que llevan implícita de las expresiones fuerza-tiempo. En la mayoría de las aplicaciones de energía conferida por la bomba es una mezcla de las tres. Las cuales se comportan de acuerdo con las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos.

Lo inverso a lo que sucede en una bomba se tiene en una máquina llamada comúnmente turbina, la cual transforma la energía de un fluido en sus diferentes componentes citadas en energía mecánica.

Para una mayor claridad, buscando una analogía con las máquinas eléctricas, y para el caso específico del agua, una bomba sería un generador hidráulico, en tanto que una turbina sería un motor hidráulico.

Normalmente un generador hidráulico (bomba) es accionado por un motor eléctrico, térmico, etc. mientras que un motor hidráulico (turbina) acciona un generador eléctrico.

Tratándose de fluidos compresibles el generador suele llamarse compresor y el motor puede ser una turbina de aire, gas o simplemente un motor térmico.

Antes de conocer los fundamentos de operación de las bombas es necesario distinguir las diferentes clases de bombas que existen, y para esto la clasificación dada por el Hydraulic Institute de EE.UU. (1984) parece ser la más adecuada.

Existe una diversidad de clasificación de bombas que ocasionalmente puede causar confusión al intentar ubicarlas dentro de un cierto tipo, clave u otra distinción, sin embargo la más adecuada para propósitos de este trabajo es la proporcionada por el instituto de Hidráulica de los EE.UU.

Esta clasificación toma en cuenta la forma cómo el fluido se desplaza dentro de los elementos de la bomba, así para aquellos en los que el fluido se desplaza a presión dentro de una carcasa cerrada, como resultados del movimiento suavizada de un pistón o embolo, se le denomina bombas de desplazamiento positivo, mientras que las bombas en las cuales el fluido es desplazado por el movimiento circular de uno o varios impulsores provistos de alabe, se les denomina Bombas Centrifugas y es en el presente trabajo a estas últimas a las que se hará referencia.

La clasificación anterior parece ser la más adecuada sin embargo, puede ser útil conocer dentro de esta clasificación algunas características o situaciones que ayudara a seleccionar la bomba más adecuada. Si por ejemplo éstas pueden ser clasificadas de la siguiente manera; según el sistema donde funcionarán o la forma física de ella. Para la primera clasificación que es conocer el sistema donde la bomba tendrá su funcionamiento.

Consiste en saber si la bomba succionara del recipiente y con alturas variables o si la bomba se instalará en un sumidero o en una fosa. Así mismo es necesario el liquido que la bomba manejará : si con volátiles, viscosos, calientes o pastas aguadas, que así se manejará el concepto de densidad y partículas que la bomba pueda impulsar.

Respecto a la forma física de la bomba se debe tener en cuenta que existen bombas de eje horizontal o vertical, ambas de empujes centros o de desplazamiento positivo, baja o alta velocidad , también la especificación de los materiales deben ser compatibles con los líquidos que se bombearán.

Una práctica común es definir la capacidad de una bomba con el número adimensional llamado velocidad específica, que se describe posteriormente que es función del número de revoluciones a las que giren sus participantes rotatorias, de la siguiente forma se puede ser de alta o baja velocidad.

CLASIFICACION DE BOMBAS

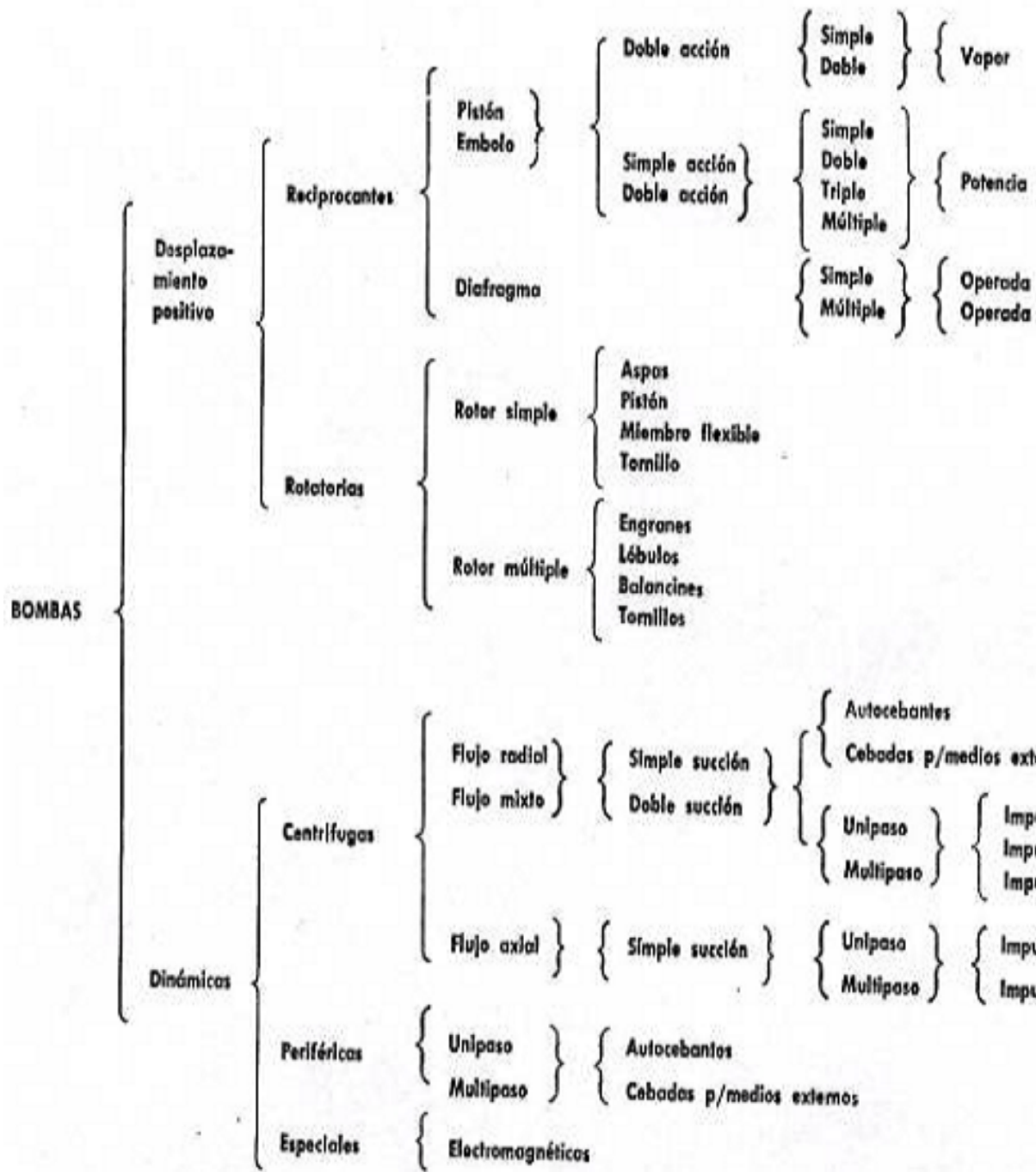


DIAGRAMA DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS

CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

Caudal

El caudal de una bomba esta determinado por la siguiente relación:

$$\text{CAUDAL} = \text{CILINDRADA} * \text{VELOCIDAD}$$

El caudal así obtenido es llamado caudal teórico, que es simplemente superior al caudal real en función del rendimiento volumétrico de la bomba, es decir de las fugas internas de la misma.

Se define el rendimiento volumétrico como la relación entre el caudal real y el caudal teórico:

Este rendimiento volumétrico oscila entre el 80 y el 99% según el tipo de bomba, su construcción y sus tolerancias internas, y según las condiciones específicas de velocidad, presión, viscosidad del fluido, temperatura, etc.

El rendimiento total de una bomba es el producto de sus rendimientos volumétrico y mecánico:

El rendimiento total de una bomba nueva puede oscilar entre el 50 y el 90%, valores que disminuirán con el uso y el desgaste de los elementos de estanqueidad interna propia de la bomba.

Presión de Trabajo

Todos los fabricantes otorgan a sus bombas un valor denominado presión máxima de trabajo, algunos incluyen las presiones de rotura o la presión máxima intermitente, y otros adjuntan la gráfica de presión /vida de sus bombas. Estos valores los determina el fabricante en función de una duración razonable de la bomba trabajando en condiciones determinadas.

El valor de la presión máxima de trabajo suele calcularse para una vida de 10000 horas; en algunos casos se especifican también las presiones máximas intermitentes o puntales.

Vida

La vida de una bomba viene determinada por el tiempo de trabajo desde el momento en que se instala hasta el momento en que su rendimiento volumétrico haya disminuido hasta un valor inaceptable, sin embargo este punto varía mucho en función de la aplicación. Así por ejemplo hay instalaciones donde el rendimiento no puede ser inferior al 90%, mientras que otras se aprovecha la bomba incluso cuando

Fig. 4. Vida de las bombas en función de la presión

su rendimiento es inferior al 50%. La vida de una bomba también varía considerablemente en función del nivel de contaminación del fluido con el que se está trabajando.

CARACTERÍSTICAS DE RENDIMIENTO Y DE SELECCIÓN DE LA BOMBA

Características de rendimiento de la bomba

El Aumento de carga real ganado por el fluido a través de una bomba se puede determinar utilizando la siguiente ecuación:

Donde 1 y 2 son las secciones de entrada y de salida de la bomba. El aumento de carga real ganado por el fluido a través de una bomba se puede determinar mediante un arreglo experimental que se muestra en la figura "disposición experimental característica para

determinar el aumento de carga ganado por un fluido que circula a través de una bomba" .

La potencia ganada por el fluido esta dada por:

y esta cantidad, expresada en términos de caballos de potencia tradicionalmente se denomina fuerza o potencia hidráulica

Además de la carga o potencia agregada al fluido, la eficiencia total esta dada por:

Donde el denominador representa la potencia total aplicada al eje de la bomba y a menudo se denomina potencia al freno. La eficiencia total de la bomba es afectada por las pérdidas hidráulicas en la bomba y además por las pérdidas mecánicas en los cojinetes y los sellos. También puede haber algo de pérdida de potencia debido a fuga del líquido entre la superficie trasera de la placa del cubo del impulsor y la caja, o a través de otros componentes de la bomba. Las características de rendimiento para una geometría y velocidad de operación de una bomba dadas se proporcionan en forma de gráficas de carga, eficiencia y potencia al freno contra el caudal como se muestra en la gráfica "características de operación para una bomba centrífuga de tamaño dado que opera a condiciones constantes de velocidad del impulsor."

Como se muestra en dicha gráfica la eficiencia es función del caudal y alcanza un valor máximo en un valor particular del caudal, comúnmente denominado caudal de diseño o capacidad de la bomba. Los puntos sobre las diversas curvas correspondientes a la eficiencia máxima se denotan como puntos de mejor eficiencia (PME).

Rendimiento volumétrico

El rendimiento volumétrico de la bomba es el cociente que se obtiene al dividir el caudal de líquido que comprime la bomba y el que teóricamente debería comprimir, conforme a su geometría y a sus dimensiones. Dicho en otros términos el rendimiento volumétrico expresa las fugas de líquido que hay en la bomba durante el proceso de compresión, fugas que se deben a las holguras existentes en el interior de los componentes de la bomba.

El rendimiento volumétrico es un factor de la bomba muy importante, pues a partir de él se puede analizar la capacidad de diseño y el estado de desgaste en que se encuentra una bomba, así si el rendimiento volumétrico disminuye con una alta tasa de cambio, el desgaste de sus elementos ya es demasiado.

El rendimiento volumétrico se ve afectado también por la presión del fluido hidráulico que se transporta y también por la temperatura del mismo.

Rendimiento mecánico

El rendimiento mecánico mide las pérdidas de energía mecánica que se producen en la bomba, debidas al rozamiento y a la fricción de los mecanismos internos. Es esencial evitar la fricción y el rozamiento en el interior de la bomba, de tal manera que la energía que se comunica al eje de la bomba se invierta, en el mayor grado posible en aumentar la presión del líquido y no en vencer rozamientos y fricciones excesivas entre las partes mecánicas de la bomba.

En términos generales se puede afirmar que una bomba de bajo rendimiento mecánico es una bomba de desgaste acelerado, principalmente debido al rozamiento que sufre las partes en

movimiento.

Rendimiento total o global

El rendimiento total o global es el producto de los rendimientos volumétrico y mecánico. Se llama total porque mide la eficiencia general de la bomba en su función de bombear líquido a presión, con el aporte mínimo de energía al eje de la bomba. Esta consideración, de aporte mínimo de energía a los mecanismos del avión, es general y muy importante en la ingeniería aeronáutica, debido a que toda la energía se obtiene de los motores.

Así pues el rendimiento total se expresa como el consumo de energía necesario para producir la presión hidráulica nominal del sistema.

Carga de Aspiración neta positiva (CANP)

Sobre el lado de aspiración de una bomba es común que haya bajas presiones, con la posibilidad concomitante de que dentro de la bomba ocurra cavitación. La cavitación ocurre cuando la presión del fluido en un punto dado es menor que la presión del vapor del líquido. Cuando ocurre esto se forman burbujas de vapor y este fenómeno puede provocar una reducción de la eficiencia, así como un daño estructural de la bomba. Para caracterizar el potencial de cavitación se usan la diferencia entre la carga total sobre el lado de aspiración, cerca de la entrada del impulsor de la bomba y la carga de presión de vapor del líquido.

La CANP se define como:

Una curva CANP se muestra en la gráfica "curvas de rendimiento para una bomba centrífuga de dos etapas que opera a 3500 r.p.m. Datos para tres diámetros diferentes del impulsor".

En realidad existen dos valores de CANP, el primero es la CANP requerida la cual es necesario mantener o exceder de modo que no ocurra cavitación. Debido a que en el ojo del impulsor se desarrollan presiones inferiores a las del tubo de aspiración, suele ser necesario determinar experimentalmente para una bomba dada la CANP requerida; el segundo valor de la CANP es la disponible que representa la carga que realmente ocurre para el sistema de flujo particular. El valor de la CANP disponible está dado por:

Para este cálculo se utilizan normalmente presiones absolutas debido a que la presión de vapor se especifica como una presión absoluta. Con base en la ecuación anterior se observa que a medida que aumenta la altura del impulsor de la bomba por arriba de la superficie del fluido, la CANP disponible disminuye. Por consiguiente existe algún valor crítico de Z por arriba del cual la bomba no puede operar sin que ocurra cavitación.

Características del sistema.

Cada sistema de flujo posee su propia ecuación del sistema específica. Si el flujo es laminar las pérdidas por fricción son proporcionales a Q más que a Q^2 .

La ecuación de un sistema donde hay una bomba está dada por:

Donde h_p es la carga real ganada por el fluido debido a la bomba y la sumatoria representa todas las pérdidas por fricción en tubería y pérdidas menores que ocurren en los accesorios y válvulas de la misma.

A efecto de elegir una bomba para una aplicación particular es necesario utilizar la curva del sistema, según es determinada por la ecuación del sistema y la curva de eficiencia de la bomba. Si ambas curvas se trazan sobre la misma gráfica como se muestra en la gráfica "Utilización de la curva del sistema y la curva de rendimiento de la bomba para obtener el punto de operación del sistema". Su intersección (punto A) representa el punto de operación del sistema. Es decir, este punto proporciona la carga y el caudal que satisfacen tanto la ecuación del sistema como la ecuación de la bomba. Idealmente se espera que el punto de operación esté próximo al mejor punto de eficiencia (MPE) de la bomba.

Las bombas se pueden disponer en serie o en paralelo a fin de obtener carga o capacidad de flujo adicionales. Cuando dos bombas se colocan en serie, la curva de eficiencia de la bomba resultante se obtiene al sumar las cargas del mismo caudal; y para dos bombas idénticas en paralelo, la curva de eficiencia combinada se obtiene al sumar los caudales a la misma carga.

Altura útil y manométrica

Se definen como altura útil de una bomba el llevado al ascenso vertical e que experimenta la superficie sobre el líquido, sea, del peso del agua hasta el depósito de almacenamiento.

Se designe a la altura humanamente que ha de una a bomba elevadora es la suma de la altura útil más las pérdidas de carga producidas en las cañerías de aspiración y de elevación

Tipos de pérdida

Las pérdidas de energía en el interior de la bomba son de tres especies:

Pérdida hidráulica: debido a un frotamiento continuo para accidentales que el líquido encuentran al atravesar la bomba, para evitarlas se deben realizar los aforismos ya enunciados.

Pérdidas volumétricas: Dividas a las fugaces que eventualmente se pueden producir al pasar el líquido a través de la bomba, las obras pueden ser diferencias de presiones, o que existe entre las partes fijas y móviles de la bomba. Otras fugas importantes son por creación de gases o vapores y ocupar un volumen concentrado en el interior de la bomba lo que provoca la disminución del caudal.

Pérdida mecánica: debido a los frotamientos mecánicos en el las partes fijas y las partes de la bomba, como por ejemplo en el pernos y cojinetes, entre pistones y cilindros, etc.

Características del Funcionamiento de las Bombas a Velocidad Constante

El rendimiento de una bomba varía considerablemente dependiendo de las condiciones bajo las cuales esté operando. Por tanto, cuando se selecciona una bomba para una situación dada, es importante que la persona encargada de realizar dicha selección tenga información relativa el funcionamiento de las distintas bombas entre las que vaya a realizarse la elección. El fabricante de bombas suele tener información de este tipo, basada en ensayos de laboratorio, sobre su catálogo de bombas estándar. Sin embargo, algunas veces las bombas de gran capacidad se fabrican a medida. A menudo se fabrica y se ensaya un modelo de tal bomba antes de realizar el diseño final del prototipo de la bomba. Aun cuando algunas bombas centrífugas son accionadas por motores de velocidad variable, la forma mas frecuente de operación de las bombas es a velocidad constante.

La forma de los impulsores y de los alabes y su relación con la envolvente de la bomba dan lugar a variaciones en la intensidad de las pérdidas por choque, la fricción del fluido y la turbulencia. Dichos parámetros varía con la altura y el caudal, siendo responsables de las grandes modificaciones en las características de las bombas. La altura en vacío es la que desarrolla la bomba cuando no hay flujo. En el caso de las bombas centrífugas de flujo mixto, la altura en vacío es alrededor de un 10 por 100 mayor que la altura normal, que es la que corresponde al punto de máximo rendimiento, mientras que en el caso de las bombas de flujo axial la altura en vacío puede ser hasta tres veces la altura normal.

La elección de una bomba para condiciones determinadas dependerá de la velocidad de giro del motor que la acciona. Si la curva característica de una bomba para una velocidad de giro dada es conocida, la relación entre la altura y el caudal para velocidades de giro distintas puede deducirse a partir de ecuaciones.

Punto de Funcionamiento de una Bomba

La manera en la que una bomba trabaja depende no sólo de las características de funcionamiento de la bomba, sino también de las características del sistema en el cual vaya a trabajar. Para el caso de una bomba dada, mostramos las características de funcionamiento de la bomba (h respecto a Q) para una velocidad de operación dada, normalmente cercana a la velocidad que da el rendimiento máximo. También mostramos la curva característica del sistema (es decir, la altura de bombeo requerida respecto a Q). En este caso, la bomba está suministrando líquido a través de un sistema de tuberías con una altura estática δz . La altura que la bomba debe desarrollar es igual a la elevación estática mas la pérdida total de carga en el sistema de tuberías (aproximadamente proporcional a Q^2). La altura de funcionamiento de la bomba real y el caudal son determinados por la intersección de las dos curvas.

Los valores específicos de h y Q determinados por esta intersección pueden ser o no ser los de máximo rendimiento. Si no lo son, significa que la bomba no es exactamente la adecuada para esas condiciones específicas.

El punto de funcionamiento o punto óptimo de una bomba solodinámica es el de la curva $H - Q$ que corresponde a un rendimiento máximo. Cuanto mas empinada se la curva $H - Q$, mas significativo será el efecto de cualquier cambio de altura en el punto de funcionamiento.

Por ejemplo, una bomba con una curva $H - Q$ empinada presentará un pequeño cambio de descarga pero la altura variará mucho si se desplaza el punto de funcionamiento, en cambio una bomba cuya curva $H - Q$ sea plana, mostrará un gran cambio de capacidad pero la altura variará poco al desplazarse el punto de funcionamiento

Las curvas $H - Q$ para las bombas centrífugas son sustancialmente planas, con tendencia a que el sedimento máximo se sitúe inmediatamente después de la capacidad media.

Las curvas $H - Q$ para una bomba de flujo axial es aún más empinada, con su punto de demanda en la descarga nula y su curva de potencia es decreciente.

Cavitación en las Bombas

Un factor importante para el funcionamiento satisfactorio de una bomba es evitar la cavitación, tanto para obtener un buen rendimiento como para evitar daños en el impulsor. Cuando un líquido pasa por el impulsor de una bomba, se produce un cambio de presión. Si la presión absoluta de un líquido cae por debajo de su presión de vapor, se producirá cavitación.

Las zonas de vaporización obstruyen el flujo limitando la capacidad de la bomba. Cuando el fluido avanza a una zona de mayor presión, las burbujas colapsan y su implosión puede producir un picado del impulsor la cavitación suele producirse con mas frecuencia cerca de la salida (periferia) de los impulsores de flujo radial y mixto, donde se alcanzan las velocidades mayores. También puede aparecer en la aspiración del impulsor, donde las presiones son menores. En el caso de las bombas de flujo axial, l parte mas vulnerable a la cavitación es el extremo de los alabes.

Para las bombas se define el parámetro de cavitación como

para evitar que se produzca cavitación, la bomba debe funcionar de manera que sea mayor que σ_c . Esto puede conseguirse seleccionando el tipo, tamaño de bomba y la velocidad de funcionamiento adecuados, y situando la bomba en el punto y a la elevación correcta dentro del sistema.

La expresión para σ_c indica que tenderá a ser pequeño (por lo que existirá la posibilidad de cavitación) en las siguientes situaciones: a) grandes alturas de bombeo; b) presión atmosférica; c) grandes valores de z_e , es decir, cuando la bomba se encuentra a una elevación relativamente grande comparada con la elevación de la superficie del agua del depósito; e) valores grandes de presión de vapor, es decir, altas temperaturas y /o bombeo de líquidos muy volátiles como gasolina.

La cavitación ocurre cuando la presión absoluta dentro de un impulsor cae por debajo de la presión del vapor del líquido y se forman burbujas de vapor. Estos se contraen mas adelante en los alabes del impulsor cuando llegan a una región de dispersión mas alta.

La $(MPS)_r$ mínima para una capacidad y velocidad dadas se define como la diferencia entre la carga absoluta de succión y la presión de vapor del líquido bombeado a la temperatura de bombeo y que es necesario para evitar la cavitación.

La cavitación de la bomba se nota cuando hay uno o mas de las siguientes señales: ruido, vibración, caída en la curva de capacidad de carga y eficiencia, con el paso del tiempo, por los daños en el impulsor por picaduras y erosión. Como todas estas señales son inexactas, se hizo necesario aplicar ciertas reglas básicas para establecer cierta uniformidad en la detección de la cavitación.

Efecto de la Viscosidad

Las bombas centrífugas también se utilizan para bombear líquidos con viscosidades diferentes a las del agua. Al aumentar la viscosidad, la curva altura caudal se hace mas vertical y que la potencia requerida aumenta. La línea discontinua indica los puntos de máximos rendimiento para cada curva. Se observa que tanto la altura como el caudal disminuyen en el punto de máximo rendimiento.

Dos de las principales pérdidas en una bomba centrífuga son por fricción con el fluido y fricción con el disco. Estas perdidas varían con la viscosidad del líquido de manera que la carga – capacidad de salida, así como de la toma mecánica difiere de los valores que se obtienen cuando se maneja agua.

Es necesario, sin embargo, conocer las tres unidades diferentes que pueden encontrarse para describir la viscosidad de un líquido en especial:

Segundos Saybolt Universal, o SSU

Centistokes – que define la viscosidad cinemática.

Centipoises – que definen la viscosidad absoluta.

Se han hecho muchas pruebas experimentales para determinar el efecto de la viscosidad del líquido en el funcionamiento de diversas bombas centrífugas. Aun con datos muy extensos sobre el efecto de la viscosidad.

Es difícil predecir con precisión el funcionamiento de una bomba cuando maneje un fluido viscoso de su comportamiento cuando emplea agua fría.

Cuando se aplican bombas ordinarias de agua fría para usarse en el bombeo de líquidos viscosos, se debe tener cuidado para asegurarse de que el diseño de la flecha es lo bastante fuerte para la potencia necesaria, que puede ser un considerable esfuerzo en los caballos de fuerza al freno para agua fría, aunque pueda ser el peso específico del líquido menor que el del agua.

SELECCIÓN DE BOMBAS

Al seleccionar bombas para una aplicación dada, tenemos varias bombas entre las que elegir. Haremos lo posible para seleccionar una bomba que opere con un rendimiento relativamente alto para las condiciones de funcionamiento dadas.

Los parámetros que se deben investigar incluyen la velocidad específica N_s , el tamaño D del impulsor y la velocidad de operación n . Otras posibilidades son el uso de bombas multietapa, bombas en serie, bombas en paralelo, etc. Incluso, bajo ciertas condiciones, limitar el flujo en el sistema puede producir ahorros de energía.

El objetivo es seleccionar una bomba y su velocidad de modo que las características de funcionamiento de la bomba en relación al sistema en el cual opera sean tales que el punto de funcionamiento esté cerca del PMR (punto de máximo de rendimiento). Esto tiende a optimizar el rendimiento de la bomba, minimizando el consumo de energía.

El punto de operación puede desplazarse cambiando la curva características de la bomba, cambiando la curva característica del sistema o cambiando ambas curvas. La curva de la bomba puede modificarse cambiando la velocidad de funcionamiento de una bomba dada o seleccionando una bomba distinta con características de funcionamiento diferentes. En algunos casos puede ser una ayuda ajustar el impulsor, es decir, reducir algo su diámetro, alrededor de un 5 por 100, mediante rectificado. Este impulsor mas reducido se instala en la cubierta original. La curva característica del sistema puede cambiarse modificando el tamaño de la tubería o estrangulando el flujo.

Una complicación que se presenta a menudo es que los niveles de ambos extremos del sistema no se mantienen constantes, como ocurre si los niveles de los depósitos fluctúan. En tal caso es difícil alcanzar un rendimiento alto para todos los modos de funcionamiento. En casos extremos a veces se utiliza un motor con velocidad variable.

El procedimiento de selección de una bomba que permita una recirculación segura es seleccionar una bomba que produzca el flujo de descarga Q_a deseado. La curva E es la característica de carga y capacidad de la bomba y la curva a es la de carga del sistema para la

descarga hacia el tanque A. La bomba funciona con una carga de Hop.

Para incluir circulación continua en el sistema de bombeo, hay que aumentar el caudal de la bomba con la carga Hop de funcionamiento para mantener una descarga de Q_a hacia el tanque A y, al mismo tiempo, una recirculación Q_b de retorno al tanque B. Para lograrlo, se selecciona el tamaño inmediato mayor de impulsor con la curva de rendimiento F.

Si se conoce el flujo Q_b con la curva Hop de funcionamiento para orificio y tubo de recirculación, el flujo de recirculación Q_s , en el punto de corte de la bomba se puede determinar con:

en donde H, es la carga de corte de la bomba con la curva de rendimiento F.

Calcúlese el flujo mínimo seguro, Q_{min} , para la bomba con curva de rendimiento F y la ecuación (2) y conviértase W_{min} a Q_{min} .

Compárese la recirculación, Q_s , en el punto de corte de la bomba contra el flujo seguro mínimo, Q_{min} . Si Q_s , es mayor que o igual a Q_{min} , esto concluye el proceso de selección.

Si Q_s es menor que Q_{min} , selecciónese el tamaño inmediato mayor de impulsor y repítase los pasos 3, 4 y 5 hasta

Determinar el tamaño de impulsor que produzca la recirculación mínima segura.

Instalación de Bombas en la Industria de Alimentos

Los productos que manipulan las bombas en la industria de la alimentación pueden ser desde soluciones acuosas y aceites vegetales ligeros a jarabes y melazas e gran viscosidad, desde líquidos puros a los que tienen gran proporción de sólidos. Dada la extensa variedad de características de estos medios. La industria emplea casi todos los tipos de bombas, con ciertas preferencias en aplicaciones concretas, como en el caso de las máquinas específicamente proyectadas como bombas para producto alimenticio con partículas atención con los detalles a estudiar.

La condición principal que deben cumplir estas bombas es que no contaminen el producto en modo alguno. Básicamente esto significa que la bomba no debe ser sensible al ataque corrosivo o abrasivo por parte del producto que se manipula y que no le teñirá en absoluto. Al final de un periodo de utilización, la bomba puede verse obligada a cierto tiempo de inactividad, o incluso pasar a manipular un producto diferente. La facilidad de limpieza y la eliminación eficaz de cualquier residuo de producto son, pues, esenciales y ello debe conseguirse mediante una simple purga; cuando se trata de una bomba de diafragma, el material elegido para este será, normalmente el caucho blanco suave, o bien, si la resistencia ataque químico ha de ser mas elevada, el "hipalón". Igualmente puede ser necesario que la cabeza de válvula, estas y las conexiones de aspiración de descarga sean de vidrio o de material estéril en lugar de metal.

Basadas en la experiencia se han establecido ciertas condiciones para los materiales. Así, en las bombas centrífugas utilizadas en la manipulación de zumos de melocotones o peras, la caja suele ser de fundición y los rodets de bronce excepto de cinc, pero esta combinación no conviene par las cerezas aunque su valor de pH sea parecido. En este caso se recurre a la construcción totalmente de bronce. Por otra parte los tomates y las leches sugieren virtualmente el uso de bombas de acero inoxidable.

Si algún material existe con las máxima posibilidades de aplicación en bombas para productos alimenticios es el hacer inoxidable, a pesar de que no deja de tener sus limitaciones sobre todo si el líquido manipulado es electrolito activo, como la salmuera.

Es importante que la bomba se proyecte y se construya de forma que el desmontaje y la limpieza sean operaciones fáciles, dado que quizás deban realizarse a diario o a intervalos regulares (según el proceso) aparte de la facilidad de repararlas y montarlas de nuevo, las superficies internas deben ser lisas y exentas de grietas y puntos de acumulación de suciedad. Esto se tendrá en cuenta al proyectar una bomba para procesos de la industria alimenticia.

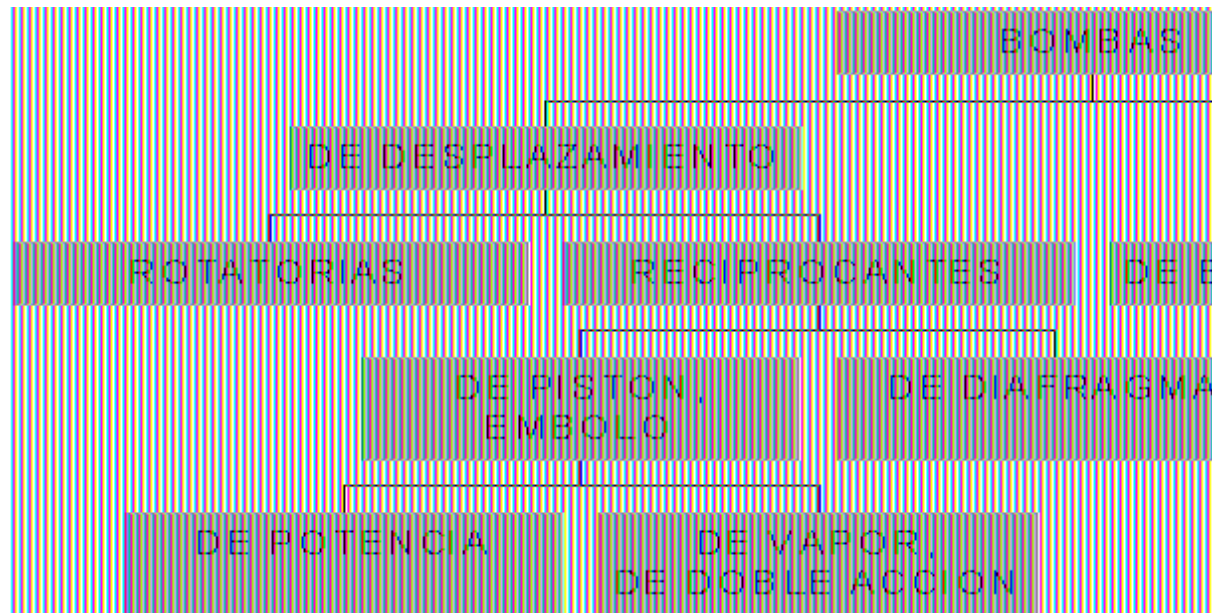
CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS

Las Bombas pueden clasificarse sobre la base de las aplicaciones a que están destinadas, los materiales con que se construyen, los líquidos que mueven y aún su orientación en el espacio. Todas estas clasificaciones, sin embargo, se limitan en amplitud tienden sustancialmente a traslaparse entre sí. Un sistema más básico de clasificación, define primero el principio por el cual se agrega energía al fluido, investiga la identificación del medio por el cual se implementa este principio y finalmente delinea las geometrías específicas comúnmente empleadas. Este sistema se relaciona por lo tanto, con las bombas mismas y no se relaciona con ninguna consideración externa a la bomba o aun con los materiales con que puede estar construida. Bajo este sistema, todas las bombas pueden dividirse en dos grandes categorías:

Dinámicas, en las cuales se añade energía continuamente, para incrementar las velocidades de los fluidos dentro de la máquina a valores mayores de los que existen en la descarga, de manera que la subsecuente reducción en velocidad dentro, o más allá de la bomba, produce un incremento en la presión. Las bombas dinámicas pueden, a su vez, subdividirse en otras variedades de bombas centrífugas y de otros efectos especiales.

De Desplazamiento, en las cuales se agrega energía periódicamente mediante la aplicación de fuerza a uno o más límites móviles de un número deseado de volúmenes que contienen un fluido, lo que resulta en un incremento directo en presión hasta el valor requerido para desplazar el fluido a través de válvulas o aberturas en la línea de descarga. Las bombas de desplazamiento se dividen esencialmente en los tipos reciprocantes y rotatorios, dependiendo de la naturaleza del movimiento de los miembros que producen la presión.

Cada una de estas clasificaciones mayores puede, a su vez, subdividirse en varios tipos específicos de importancia comercial, como se indica en la siguiente figura.



BOMBA DE POTENCIA

Una bomba de potencia es una máquina alternativa de velocidad constante, par motor constante y capacidad casi constante, cuyos émbolos o pistones se mueven por medio de un cigüeñal, a través de una fuente motriz externa.

La capacidad de la bomba varía con el número de émbolos o pistones. En general, mientras mayor sea el número, menor es la variación en capacidad, a un número dado de rpm. La bomba se diseña para una velocidad, presión, capacidad y potencia específicas. La bomba puede aplicarse a condiciones de potencia menores que las del punto específico de diseño, pero con sacrificio de la condición más económica de operación.

Las Bombas se construyen en versiones tanto verticales como horizontales. La construcción horizontal se utiliza en bombas de émbolo de hasta 200 HP. Esta construcción es generalmente abajo del nivel de cintura y proporciona facilidad en el ensamble y mantenimiento. Se construyen con tres o cinco émbolos. Las bombas horizontales de pistón llegan hasta los 2.000 HP y normalmente tienen dos o tres pistones, que son de acción simple o doble. La construcción vertical se usa en bombas de émbolo hasta 1.500 HP, con el extremo de fluido sobre el extremo motriz. Esta construcción elimina el peso del émbolo sobre los bujes, empaques y la cruceta y tiene un dispositivo de alineamiento del émbolo con el empaque. Se requiere un arreglo especial de sellado para evitar que el líquido del extremo del fluido se mezcle con el aceite del extremo motriz. Pueden haber de tres a nueve émbolos.

Los émbolos son aplicables a bombas con presiones desde 1.000 hasta 30.000 [lb/ pulg²]. La presión máxima desarrollada con un pistón es de alrededor de 1.000 [lb/ pulg²]. La presión desarrollada por la bomba es proporcional a la potencia disponible en el cigüeñal. Esta presión puede ser mayor que el rango del sistema de descarga o bomba. Cuando la presión desarrollada es mayor que estos rangos se puede originar una falla mecánica. Para evitar esto debe instalarse un dispositivo de alivio de presión entre la brida de descarga de la bomba y la primera válvula en el sistema de descarga.

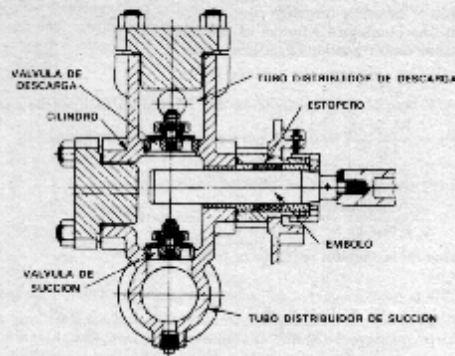


Fig. 9 Extremo líquido de bomba horizontal. (Ingersoll-Rand Co.)

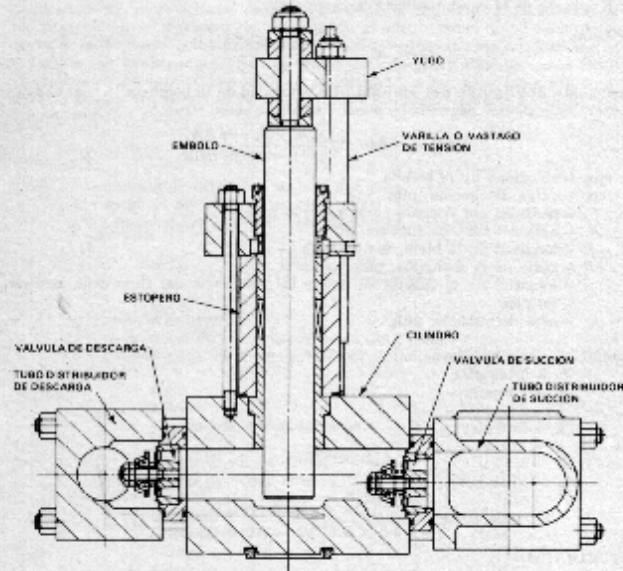


Fig. 10 Bomba vertical de extremo líquido. (Ingersoll-Rand Co.)

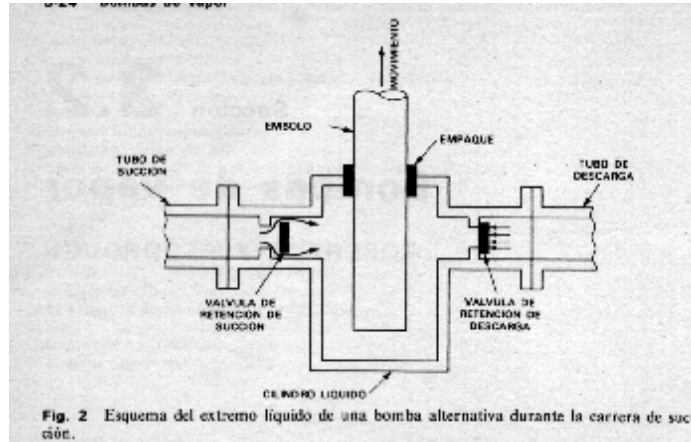
BOMBA DE VAPOR

Una bomba alternativa de desplazamiento positivo es aquella en la que el émbolo o pistón desplaza un volumen dado de fluido en cada carrera. El principio básico de una bomba alternativa es que un sólido desplazará un volumen igual de líquido. Por ejemplo, un cubo de hielo dejado caer dentro de un vaso completamente lleno de agua, derramará un volumen de agua fuera del vaso, igual al volumen sumergido del cubo de hielo.

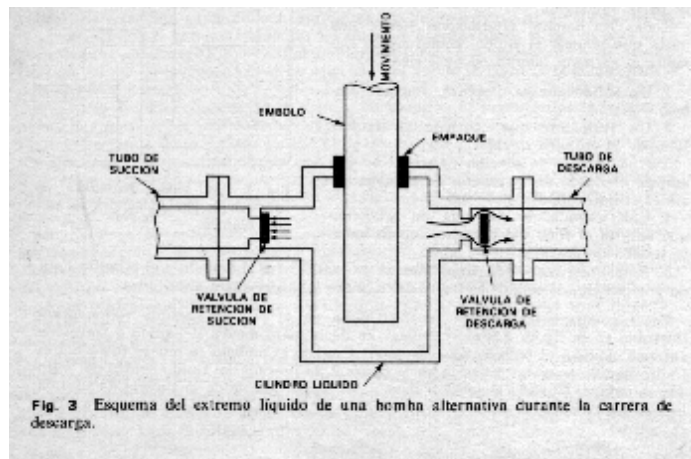
Todas las bombas alternativas tienen una parte que maneja el fluido, comúnmente llamada el extremo líquido, el cual tiene:

- ◇ Un sólido que desplaza, llamado émbolo o pistón.
- ◇ Un recipiente que contiene al líquido, llamado el cilindro líquido.
- ◇ Una válvula de succión de retención que admite el fluido de la tubería de succión hacia el cilindro líquido.
- ◇ Una válvula de descarga de retención que admite el flujo del cilindro líquido hacia la tubería de descarga.
- ◇ Empaque para sellar perfectamente la junta entre el émbolo y el cilindro líquido y evitar que el líquido se fugue del cilindro y el aire entre al cilindro.

Para bombear, es decir para mover el líquido a través del extremo líquido, el émbolo debe moverse. Cuando el émbolo se mueve hacia afuera del cilindro líquido, como se muestra en la figura 2, la presión del fluido dentro del cilindro se reduce. Cuando la presión llega a ser menor que la de la tubería de succión la válvula de succión de retención se abre y el líquido fluye al cilindro para llenar el volumen vaciado al retirar el émbolo. Durante esta fase de la operación, la válvula de descarga de retención se mantiene cerrada debido a la mayor presión en la tubería de descarga. Esta parte la acción de bombeo de una bomba alternativa de desplazamiento positivo se llama la carrera o golpe de succión.



El movimiento hacia atrás debe pararse antes de que el extremo del émbolo llegue al empaque. Entonces el movimiento del émbolo se invierte, iniciándose la parte de la acción de bombeo conocida como la carrera o golpe de descarga, como se ilustra en la figura 3.



El movimiento del pistón dentro del cilindro origina un incremento en la presión del líquido ahí contenido. Esta presión inmediatamente llega a ser mayor que la presión en la tubería de succión originando que la válvula de succión de retención se cierre. Mediante los siguientes movimientos del émbolo, la presión del líquido continúa elevándose. Cuando la presión del líquido en el cilindro alcanza la de la tubería de descarga, la válvula de descarga de retención es forzada a abrirse y el líquido fluye hacia la tubería de descarga. El volumen forzado hacia la tubería de descarga es igual al desplazamiento del émbolo menos pérdidas muy pequeñas.

BOMBAS CENTRIFUGAS



Las bombas centrífugas prevén su nombre al hecho de que elevan el líquido por la acción de la fuerza centrífuga, que la imprime un rotor, colocado en su interior, el cual es accionado por un motor eléctrico.

Un físico francés fue el primero que ideó las características esenciales de este tipo de bomba, la cual ha ido evolucionando a través de numerosos patentes. Toda una centrífuga, consta de un rotor de pocos a la vez fijos, el cual gira dentro de la caja envolvente, generalmente de forma espiral. El líquido proveniente de la cañería en que la por el centro del rotor, al girar bruscamente a la masa líquida una fuerza centrífuga, que lo hace salir por los canales situados entre los alavés, y la envoltura de la caja donde progresivamente la energía cinética de la corriente líquida se transforma en energía potencial de presión.

Así como la turbina Francis evolucionó hacia la turbina a hélice, con la necesidad de generar más revoluciones, las bombas centrífugas evolucionaron a las bombas de hélice o de flujo axial, como inconveniencia de ir aumentando el diámetro del eje del rotor, para permitir el ingreso de mayores caudales.

Así cuando se desea obtener mayores caudales se dispone de uno o más rotores sobre el mismo árbol motor.

Las bombas centrífugas, debido a sus características, son las bombas que más se aplican en la industria. Las razones de estas preferencias son las siguientes:

- ◇ Son aparatos giratorios.
- ◇ No tienen órganos articulados y los mecanismos de acoplamiento son muy sencillos.
- ◇ La impulsión eléctrica del motor que la mueve es bastante sencilla.
- ◇ Para una operación definida, el gasto es constante y no se requiere dispositivo regulador.
- ◇ Se adaptan con facilidad a muchas circunstancias.

Aparte de las ventajas ya enumeradas, se unen las siguientes ventajas económicas:

- ◇ El precio de una bomba centrífuga es aproximadamente $\frac{1}{4}$ del precio de la bomba de émbolo equivalente.
- ◇ El espacio requerido es aproximadamente $\frac{1}{8}$ del de la bomba de émbolo equivalente.
- ◇ El peso es muy pequeño y por lo tanto las cimentaciones también lo son.
- ◇ El mantenimiento de una bomba centrífuga sólo se reduce a renovar el aceite de las chumaceras, los empaques del prensa-estopa y el número de elementos a cambiar es

muy pequeño.

FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Las bombas centrífugas mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles; son pues, máquinas hidráulicas que transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico.

Los elementos constructivos de que constan son:

- a) Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- b) El impulsor o rodete, formado por una serie de alabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular. El rodete va unido solidariamente al eje y es la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta el centro del rodete, que es accionado por un motor, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), adquiriendo una aceleración y absorbiendo un trabajo.

Los alabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación; en la voluta se transforma parte de la energía dinámica adquirida en el rodete, en energía de presión, siendo lanzados los filetes líquidos contra las paredes del cuerpo de bomba y evacuados por la tubería de impulsión.

La carcasa, (voluta), está dispuesta en forma de caracol, de tal manera, que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior; la separación va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión; en algunas bombas existe, a la salida del rodete, una directriz de alabes que guía el líquido a la salida del impulsor antes de introducirlo en la voluta.

- ◆ Una tubería de impulsión.– La finalidad de la voluta es la de recoger el líquido a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

La voluta es también un transformador de energía, ya que disminuye la velocidad (transforma parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión), aumentando la presión del líquido a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta.

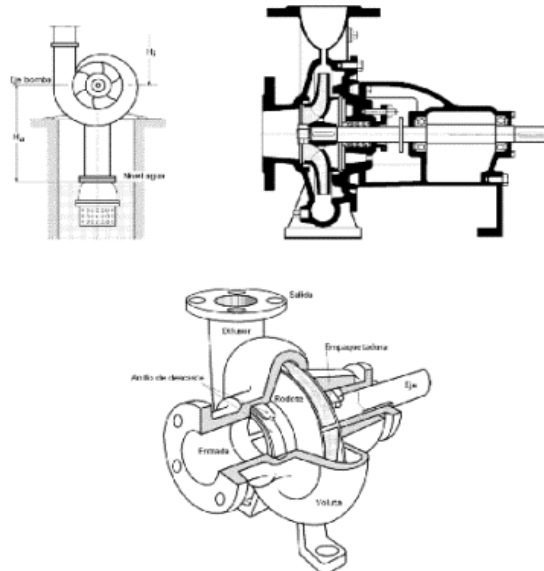


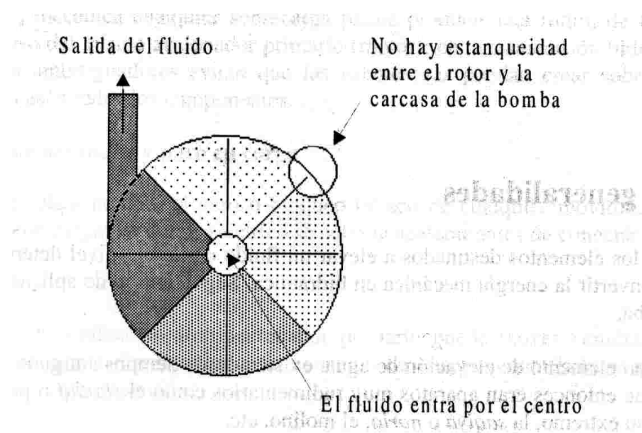
Fig. I.1.– Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva

Este es, en general, el funcionamiento de una bomba centrífuga aunque existen distintos tipos y variantes.

La estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad comunicada por el rodete al líquido se transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO Y NO POSITIVO

Bombas de desplazamiento no positivo



Estas bombas son empleadas generalmente para el trasiego de fluidos, la energía cedida al fluido es cinética y funciona generalmente mediante fuerza centrífuga. Una bomba de desplazamiento no positivo, también llamada hidrodinámica no dispone de sistemas de estanqueidad entre los orificios de entrada y salida; por ello produce un caudal que variara en función de la contrapresión que encuentre el fluido a su salida (Bomba centrífuga).

El caudal suministrado por la bomba no tiene suficiente fuerza para vencer la

Fig. 2. Rendimiento de una bomba centrífuga

presión que encuentra en la salida y al no existir estanqueidad entre esta y la entrada, el fluido fuga interiormente de un orificio a otro y disminuye el caudal a medida que aumenta la presión, según la gráfica que se muestra en la figura.

En este tipo de bombas la presión máxima alcanzable variara en función de la velocidad de rotación del elemento impulsor.

Dentro de este grupo de bombas de desplazamiento no positivo se incluyen las bombas peristálticas, que son un intermedio entre estas y las de desplazamiento positivo y principalmente se utilizan para bajas presiones.

Bombas de desplazamiento positivo

Características Principales

Las bombas hidrostáticas de desplazamiento positivo son los elementos destinados a transformar la energía mecánica en hidráulica. Estas bombas son aquellas que suministran la misma cantidad de líquido en cada ciclo o revolución del elemento de bombeo, independiente de la presión que encuentre el líquido a su salida.

Estas bombas guían al fluido que se desplaza a lo largo de toda su trayectoria, el cual siempre está contenido entre el elemento impulsor, que puede ser un embolo, un diente de engranaje, un aspa, un tornillo, etc., y la carcasa o el cilindro. El movimiento del desplazamiento positivo consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara. Por consiguiente, en una máquina de desplazamiento positivo, el elemento que origina el intercambio de energía no tiene necesariamente movimiento alternativo (émbolo), sino que puede tener movimiento rotatorio (rotor).

Sin embargo, en las máquinas de desplazamiento positivo, tanto reciprocantes como rotatorias, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión) y disminuye volumen (impulsión), por esto a éstas máquinas también se les denomina Volumétricas.

VENTAJA DE LAS BOMBAS POSITIVAS

Las bombas positivas tienen la ventaja de que para poder trabajar no necesitan "cebarse", es decir, no es necesario llenar previamente el tubo de succión y el cuerpo de la bomba para que ésta pueda iniciar su funcionamiento, tal como acontece en las bombas centrífugas. En las bombas positivas, a medida que la bomba por sí misma va llenándose de líquido, éste va desalojando el aire contenida en la tubería de succión, iniciándose el escurrimiento a través del sistema cuando ha acabado de ser desalojado el aire.

Para completar lo antes dicho relativo a las bombas positivas o de presión mecánica ya sea reciprocante o rotatoria y por lo que respecta a la altura de succión más conveniente en ellas, al final se da el diagrama 8 en el cual puede encontrarse la altura práctica de succión a que conviene instalar una bomba de éstas, con el fin de obtener de ellas su mejor funcionamiento.

Queda entendido que la altura práctica de succión aquí indicada, es igual a la distancia vertical a la que puede ser elevada el agua en la succión, menos las pérdidas de carga por fricción y otras si las hay.

Fig. 3. Rendimiento de una bomba de desplazamiento positivo

La homogeneidad de caudal en cada ciclo se consigue gracias a unas tolerancias muy ajustadas entre el elemento de bombeo y la carcasa de la bomba. Así, la cantidad de líquido que fuga interiormente en la bomba de desplazamiento positivo es mínima, y despreciable comparada con el máximo caudal de la misma.

Cuando estas bombas presentan fugas internas considerables deben ser reparadas o sustituidas ya que no trabajan correctamente. Orientativamente el rendimiento volumétrico de las bombas de desplazamiento positivo, aunque varía de un tipo a otro no debe ser inferior al 85%.

La comparación entre las gráficas de rendimiento para cada tipo hace comprender el porque todas las bombas de los sistemas hidráulicos de aviación son de desplazamiento positivo. Las tres razones más importantes son:

En la bomba de desplazamiento no positivo, cuando el esfuerzo a vencer por el sistema alcance un valor determinado, la bomba dejará de dar caudal y el equipo se detendrá.

En el caso anterior, y aun antes de alcanzar este valor concreto de presión, el caudal va disminuyendo notablemente, por lo que no se dispone de un control preciso de la velocidad de movimiento del sistema.

Las fugas internas en este tipo de bombas implican un elevado consumo de energía mecánica que se desaprovecha al no convertirse en energía hidráulica.

Las bombas hidrostáticas se agrupan según el tipo de elemento de bombeo y se dividen en dos grupos principales: Bombas de caudal fijo y bombas de caudal variable. El desplazamiento de fluido en cada cilindrada de una bomba de caudal fijo se mantiene constante en cada ciclo o revolución, pues el caudal es constante a una velocidad de trabajo determinada; por el contrario, el caudal de salida de una bomba de caudal variable puede cambiarse y alterar la geometría del elemento de bombeo o la cilindrada del mismo.

BOMBAS DE CAUDAL VARIABLE

Aunque todas las bombas pueden variar su caudal de salida, simplemente cambiando la velocidad de trabajo, se entiende por bombas de caudal variable aquellas que, manteniendo constante el régimen de funcionamiento, pueden cambiar el caudal de salida cambiando la geometría o el volumen de las cámaras de bombeo internas; por ello se llaman bombas de cilindrada variable.

Fig. 18. Bomba de paletas de caudal variable

La variación de la cilindrada en estas bombas se consigue de diversas formas, entre ellas las más frecuentes son de control manual por palanca, control manual por volante, servocontrol, compensador de presión, pilotaje externo, control electrónico, etc. Este tipo de bombas se emplean principalmente para transmisiones hidrostáticas.

BOMBAS MÚLTIPLES

Son muchos los sistemas hidráulicos en los que por uno u otro motivo se precisa de diversas bombas para uno o varios circuitos. Para solucionar este problema de la forma más

económica se han desarrollado las bombas múltiples, es decir varias unidades de bombeo, de igual o distinta cilindrada colocadas sobre un mismo cuerpo y accionadas simultáneamente por un mismo eje motriz.

Existen muchos modelos de bombas múltiples, pudiendo estas ser combinaciones de varias bombas de engranajes, o de pistones o combinaciones de las mismas. En la mayoría de las aplicaciones las bombas múltiples se emplean para suministrar energía a diversos circuitos de un mismo sistema hidráulico; sin embargo existen otras aplicaciones para las bombas dobles o múltiples en las que el caudal de la segunda bomba pasa directamente a la primera.

BOMBAS OSCILANTES

Estas bombas constan de un vástago conectado a un pistón, con sus elementos de estanqueidad, que se desplaza en el interior de un orificio cilíndrico cerrado por el extremo opuesto por donde tiene los orificios de aspiración y salida. Aquí, se transforma la fuerza y el movimiento lineal de un vástago en energía hidráulica.

Fig. 5. Bomba Manual

Se debe saber que mientras no se conecte el orificio de salida a un accionador que genere contrapresión, el accionamiento consumirá muy poca energía, y se limitará a suministrar el caudal determinado. Cuando exista la contrapresión, la energía para mover el émbolo incrementará en función de la presión que alcance el fluido.

A continuación se muestra cómo al salir el pistón se crea vacío en la cámara de bombeo. Este vacío succiona el fluido del depósito a través del antirretorno de aspiración y cierra el antirretorno de salida. Al cambiar el sentido del pistón, el fluido sale, cerrando el antirretorno de aspiración abriendo el de la línea de impulsión.

Todas las bombas hidrostáticas suministran el mismo volumen de líquido en cada ciclo, y esto no varía en función de la velocidad de accionamiento.

Las unidades típicas son: centímetros cúbicos por revolución, o litros por minutos. En la mayoría de los casos el caudal se determina a 1500 r.p.m.

Un ejemplo de bombas oscilantes son las manuales. Son empleadas en los circuitos hidráulicos como fuente de presión y de caudal.

Fig. 6. Bomba manual de doble efecto

Existen diversos tipos de bombas manuales, simples, donde el bombeo se realiza por una sola cámara del cilindro; dobles, mientras que una cámara del cilindro está aspirando, la otra está bombeando; combinadas, de gran caudal a baja presión y viceversa, para conseguir un avance rápido del accionador y elevada presión a poca velocidad.

En estas bombas la presión máxima se logra en función del esfuerzo aplicado en la palanca de accionamiento.

BOMBAS ROTATIVAS

Este tipo de movimiento es el que traslada el fluido desde la aspiración hasta la salida de presión. Según el elemento que transmita tal movimiento, se clasifican en bombas de

engranajes, paletas, pistones etc.

◆ **Bombas De Engranajes Externos**

Produce caudal al transportar el fluido entre los dientes de dos engranajes acoplados. Uno de ellos es accionado por el eje de la bomba (motriz), y este hace girar al otro (libre).

Fig. 7. Bomba de engranajes externos de baja presión

Lo que sucede es el origen de un vacío en la aspiración cuando se separan los dientes, por el aumento del volumen en la cámara de aspiración. En el mismo momento los dientes se van alejando, llevándose el fluido en la cámara de aspiración. La impulsión se origina en el extremo opuesto de la bomba por la disminución de volumen que tiene lugar al engranar los dientes separados.

Fig. 8. Bomba de engranajes externos de alta presión

El tipo de bomba más utilizado son las de engranajes rectos, además de las helicoidales y behelicoidales.

En condiciones óptimas estas bombas pueden llegar a dar un 93% de rendimiento volumétrico.

Son sin lugar a dudas las bombas más ruidosas del mercado. Por ello no se emplean en aplicaciones fijas e interiores, donde su nivel sonoro puede perjudicar a los operarios que las trabajan.

◆ **Bombas De Lóbulos**

Son bombas rotativas de engranajes externos, que difieren de estas en la forma de accionamiento de los engranajes. Aquí ambos engranajes son accionados independientemente por medio de un sistema de engranajes externo a la cámara de bombeo.

Fig. 9. Bomba de Lóbulos

Ofrecen un mayor desplazamiento, pero su coste es mayor y sus prestaciones de presión y velocidad son inferiores a las de las bombas de engranajes.

◆ **Bombas De Husillos**

También llamadas de tornillos, son bombas de engranajes de caudal axial. Existen tres tipos de bombas de husillo: de un solo husillo, un rotor en forma de espiral excéntricamente en el interior de un estator. De doble husillo, dos rotores paralelos que se entrelazan al girar en una carcasa mecanizada con ciertas tolerancias. De triple husillo, un rotor central (motriz), y dos rotores que se entrelazan con el primero.

En estas bombas, el fluido que rodea los rotores en la zona de aspiración es atrapado a medida que estos giran, es empujado y forzado a salir por el otro extremo. Las principales aplicaciones de este tipo de bombas son en sistemas hidráulicos donde el nivel sonoro debe controlarse.

◆ **Bombas De Engranajes Internos.**

Están compuestas por dos engranajes, externo e interno. Tienen uno o dos dientes menos que el engranaje exterior. Tienen un desgaste menor por la reducida relación de velocidad existente. Son utilizadas en caudales pequeños. Y pueden ser de dos tipos: semiluna y gerotor.

◆ **Bombas De Semiluna.**

En estas bombas entre los dos engranajes hay una pieza de separación en forma de media luna. Está situada entre los orificios de entrada y salida, donde la holgura es máxima. La estanqueidad se consigue entre el extremo de los dientes y la semiluna; posteriormente en el orificio de salida, los dientes se entrelazan, reducen el volumen y forzan a salir el fluido. Estas bombas se emplean actualmente para modelos de dos etapas para presiones superiores a 280 bar.

Fig. 10. Bomba de semiluna

◆ **Bombas Gerotor**

Consiste en un par de engranajes que están siempre en contacto. El rotor interno arrastra al externo que a su vez tiene un diente más, girando en la misma dirección.

Fig. 11. Bomba gerotor

El fluido entra a la cámara donde los dientes se separan y es expulsado cuando se entrelazan de nuevo.

◆ **Bombas de paletas**

Un determinado número de paletas se desliza en el interior de unas ranuras de un rotor que a su vez gira en un anillo. Las cámaras de bombeo se generan entre las paletas, el rotor y el anillo.

Durante la rotación, a medida que aumenta el espacio comprendido entre las paletas, el rotor y el anillo, se crea un vacío que hace que entre el fluido por el orificio de aspiración. Cuando se reduce el espacio, se ve forzado a salir. La estanqueidad se consigue entre el conjunto paletas-rotor y las placas laterales, así como al ajustar el vértice de las paletas y el anillo.

Normalmente estas bombas no están recomendadas a trabajar en velocidades inferiores a 600 r.p.m.

Fig. 12. Bomba de paletas

◇ **Bombas De Paletas No Compensadas**

Aquí el alojamiento es circular y dispone de un solo orificio de aspiración y otro de presión. Teniendo las cámaras opuestas, generan cargas laterales sobre el eje motriz. Y pueden ser de caudal fijo o variable, normalmente usadas a presiones inferiores a 175 bar.

◇ **Bombas De Paletas Compensadas**

Sólo existen para caudales fijos, se diferencian en que su anillo es elíptico, lo que permite utilizar dos conjuntos de orificios de aspiración y de impulsión. En estas bombas se anulan los esfuerzos laterales, puesto que las dos cámaras están separadas 180 grados lo que hace que las fuerzas laterales se equilibren.

Fig. 13. Bomba de paletas compensadas

◇ **Bombas De Paletas Fijas**

No se utilizan en sistemas hidráulicos por su pequeña cilindrada y por ser ruidosas. Tienen el rotor elíptico, anillo circular y paletas fijas internamente.

◆ **Bombas De Pistones**

Son unidades rotativas, que disponen de conjuntos pistón–cilindro. Parte del mecanismo gira alrededor de un eje motor que crea un movimiento oscilante del pistón, haciendo que este aspira el fluido hacia el interior del cilindro en la carrera de expansión y expulsarlo en la carrera de compresión. Son de dos tipos: axiales y axiales en línea.

◇ **Bombas De Pistones Axiales**

Los pistones en estas bombas oscilan axialmente, es decir paralelos al eje así que el movimiento rotativo del eje motriz se convierte en un movimiento axial oscilante de los pistones. Suelen utilizar varios pistones y válvulas de retención.

Fig. 14. Bomba de pistones axiales

◇ **Bombas De Pistones Axiales En Línea**

Tiene como diseño más sencillo el de barrilete de cilindros que gira accionado por eje motriz. Los pistones en los orificios del barrilete se conectan al plato inclinado y de una anillo de retroceso.

A medida que el barrilete gira, los pies de los pistones siguen apoyados al plato, haciendo que se muevan linealmente respecto al eje. Los orificios en la placa de distribución permiten que los pistones pasen por el orificio de entrada cuando empiezan a salir de sus alojamientos y por la salida cuando entran al alojamiento de nuevo.

◇ **Bombas De Pistones Axiales En Ángulo**

Están compuestas por un eje motriz, el barrilete de cilindros y una placa de válvulas, encarada esta última con los orificios de los cilindros del barrilete. El eje motriz está en ángulo con relación al eje del barrilete. La placa de válvulas tiene orificios dispuestos de forma que la aspiración está abierta a los orificios de los cilindros en la zona de revolución. Su orificio de salida está encarado a los orificios de los pistones en la zona en la que los pistones se acercan a la placa de válvulas. Esto permite que en el giro de la bomba los pistones succionen fluido hacia el interior de los cilindros, y lo expulsan por la cámara de salida.

◇ **Bombas De Pistones Axiales Con Placa Oscilante**

La diferencia entre esta bomba y la axial en línea es que los pistones son estáticos y lo que gira es la placa inclinada. Gira la placa y produce el desplazamiento de los pistones, lo que permite que los pistones aspiren y expulsan el fluido.

◇ **Bombas De Pistones Radiales**

En estas bombas los pistones están ubicados radialmente en un bloque de cilindros, y se mueven perpendicularmente con relación al eje. Dos tipos básicos de bombas de pistones radiales son los de caudal fijo y caudal variable.

Fig. 16. Bomba de pistones radiales

Esta figura muestra el bloque de cilindros que gira sobre un pivote estacionario en el interior

de un anillo circular o rotor. A medida que el bloque gira, el pistón sigue la superficie interna del anillo.

◊ **Bombas De Pistones Oscilantes**

Al igual que un motor de explosión, los pistones se mueven en un sentido por el esfuerzo transmitido por un cigüeñal, una excentricidad del eje o un plato. La diferencia entre estas comparaciones es que lo que en el motor de explosión es el eje de salida, en la bomba es el eje primario por el que recibe la energía; y los pistones del motor son los que en la bomba generarían la presión y el caudal.

Fig.17 Bomba de pistones oscilantes

Estas bombas tienen como ventajas: ofrecen un sistema de estanqueidad mucho mejor entre la entrada y la salida, además que en estas bombas la lubricación de las partes móviles puede hacerse con un fluido distinto al bombeado.

BOMBAS RECIPROCANTES

El funcionamiento de una Bomba Reciprocante depende del llenado y vaciado sucesivo de receptáculos de volumen fijo, para lo cual cierta cantidad de agua es obligada a entrar al cuerpo de la bomba en donde queda encerrada momentáneamente, para después ser forzada a salir por la tubería de descarga, (ver figura 103). De lo anterior se deduce, en términos generales, que el gasto de una Bomba Reciprocante es directamente proporcional a su velocidad de rotación y casi independiente de la presión de bombeo.

Como el proceso de llenado y vaciado sucesivo de receptáculos de volumen fijo requiere fricción por resbalamiento entre las paredes estacionarias del receptáculo y las partes móviles, estas bombas no son apropiadas para manejar líquidos que contengan arenas o materias en suspensión. Además, la variación cíclica del gasto de descarga puede obligar al empleo de Cámara de aire y de grandes tuberías.

Estas bombas son relativamente de baja velocidad de rotación, de tal manera que cuando tienen que ser movidas por motores eléctricos deben ser intercaladas transmisiones de engranes o poleas para reducir la velocidad entre el motor y la bomba.

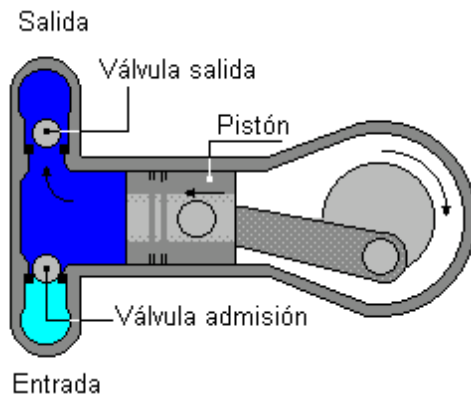
Clasificación:

- ◊ Bombas de émbolo reciprocante.
- ◊ Bombas de embolo reciprocante de descarga variable.
- ◊ Bombas reciprocantes de diafragma.

BOMBA DE DIAFRAGMA

Ocasionalmente, las bombas reciprocantes están provistas de un diafragma flexible recíprocamente en vez de un émbolo o pistón reciprocante, con lo cual se elimina la fricción y las fugas en el punto donde el émbolo atraviesa la caja de empaque. Un ejemplo de esta bomba queda ilustrado en la figura en la cual el movimiento del diafragma es obtenido mediante una cama excéntrica y una palanca; las válvulas de succión y de descarga trabajan en forma ordinaria. Tales bombas son muy comunes en la actualidad para levantar combustible de los tanques posteriores de los automóviles a los carburadores de los mismos.

De pistón



BOMBA DE EMBOLO

Los elementos de una Bomba Reciprocante, comúnmente llamada de émbolo o de presión, están mostrados esquemáticamente en la figura 103. En ella puede verse que, como la Manivela o Cigüeñal gira con una velocidad uniforme, accionada por el motor, el émbolo o pistón se mueve hacia adelante y hacia atrás en el cuerpo del cilindro; en el golpe hacia afuera un vacío parcial detrás del émbolo permite a la presión atmosférica que obra sobre la superficie del agua en el pozo hacer subir el agua dentro del tubo de succión, la cual, pasando por la válvula de succión llena el cilindro; en el golpe hacia adentro, la válvula de succión se cierra y el agua es presionada a salir hacia el tubo de descarga.

Eficiencia Volumétrica de una bomba de émbolo:

$$\eta_{vol} = \frac{Q - Q_E}{Q} \cdot 100$$

Gasto ideal o teórico:

$$Q_i = \frac{\pi}{4} D^2 v$$

Gasto efectivo:

$$Q_e = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{2RN}{60} \frac{100 - \text{fugas}}{100}$$

Presión dinámica o de inercia que tiene lugar en las tuberías de descarga y de succión de una bomba de émbolo:

$$P_i = \frac{\rho L}{g} \frac{2\pi N^2}{60} R \cos \theta \frac{D^2}{d^2}$$

$$^o P_i = KLRN^2 \cos \theta \frac{D^2}{d^2}$$

BOMBA RECIPROCANTE DE EMBOLO DE DESCARGA VARIABLE.

En sistemas de transmisión de circuito hidráulico cerrado, es algunas veces necesaria una forma de bomba cuyo gasto de descarga pueda ser variado sin cambiar la velocidad de rotación. Tal bomba está indicada en la figura, tiene un cierto número de cuerpos cilíndricos paralelos A, hechos formando un bloque B, que gira mediante engranes alrededor de un eje central.

Los pistones o émbolos están articulados a un anillo D que es mantenido en contacto con un platillo E, el cual puede inclinarse fuera de la perpendicular; de este modo cuando el anillo D gira en conjunto con el bloque de cilindros, también se balancea e imparte el movimiento recíprocante necesario a los pistones o émbolos.

En estas bombas no son necesarias las válvulas que tienen las bombas de émbolo antes descritas; en su lugar tienen dos entradas o ranuras semicirculares que obturan las extremidades de los cilindros, una de las entradas está conectada a la tubería de succión y la otra a la de descarga. Así todos los cilindros del bloque en el lado en que suben los émbolos, que es cuando se mueven éstos hacia afuera, son puestos en comunicación directa con la tubería de succión, mientras que el líquido descargado de los cilindros en los cuales bajan los émbolos, tienen salida libre al tubo de descarga.

A fin de variar el gasto de descarga de la bomba, es necesario alterar la carrera de los émbolos, lo cual puede hacerse cambiando el ángulo de inclinación del plato E. Para este objeto el plato está montado sobre ejes, de tal modo que él puede mecerse alrededor de un eje horizontal, transversal al eje principal de la bomba. Mientras más normal se hace el plato E, menor será la descarga, hasta que ésta cesa por completo cuando el plato E, es paralelo a F. Si se sigue variando la inclinación, el escurrimiento vuelve a tener lugar; pero ahora en sentido contrario, saliendo el líquido por el tubo en que antes se hacía la succión.

Debido al hecho de que estas bombas son empleadas exclusivamente para manejar aceite y de que todas las partes móviles están ahogadas en aceite, a pesar del número de superficies de fricción que tienen, alcanzan una alta eficiencia, de un ochenta por ciento o más. La presión media usual de trabajo es de unos 35 kg/cm².

BOMBAS ROTATORIAS

Estas bombas, como ya antes se dijo» no tienen válvulas ni partes recíprocantes; el movimiento del líquido es efectuado por la acción combinada de dos elementos giratorios semejantes a las ruedas dentadas. En la bomba Stone–Paramor, el elemento giratorio que es acoplado directamente a la flecha motora, es un piñón de cuatro dientes que engrana con una corona dentada de seis dientes.

Esta corona gira dentro de la armadura de la bomba a $\frac{2}{3}$ de la velocidad con que gira la flecha motora. Una lengüeta fija de forma creciente y saliente de la armadura, impide el de descarga a la de succión. La forma en la cual el líquido es llevado de la entrada de la succión a la descarga se ve claramente en la figura 112, donde los puntos son usados para indicar las posiciones sucesivas del líquido en el hueco dejado entre el piñón y la corona, después de que la flecha ha girado $\frac{1}{8}$ de revolución. Cuando se bombea aceite lubricante contra una presión de unos 7 kg/cm² a esta máquina tiene una eficiencia mecánica de más de 70% y una eficiencia, volumétrica de 95%. No debe intentarse el emplearla para el bombeo de líquidos delgados. Debido a su gasto de descarga casi uniforme, las bombas positivas rotatorias pueden trabajar a grandes velocidades sin el peligro de que se presenten presiones de inercia ni aún en el caso de no ser empleadas Cámaras de aire. Las bombas Stone–Paramor, por ejemplo, con una capacidad de 720 litros por minuto pueden trabajar a 300 r.p.m.

BOMBAS LOBULARES

Éstas se asemejan a las bombas del tipo de engranes en su forma de acción, tienen dos o más rotores cortados con tres, cuatro, o más lóbulos en cada rotor. Los rotores se Sincronizan para obtener una rotación positiva por medio de engranes externos, Debido a que el líquido se descarga en un número más reducido de cantidades mayores que en el caso de la bomba de engranes, el flujo del tipo lobular no es tan constante como en la bomba del tipo de engranes. Existen también combinaciones de bombas de engrane y lóbulo.

BOMBAS ESPECIALES

Para alimentación de calderas

Para grasa

De pozo profundo



Para lodos y drenaje



BOMBAS ESPECIALES UTILIZADAS EN AVIACION

En los circuitos hidráulicos utilizados en la aviación para distribuir la presión a diferentes puntos donde necesitamos la energía hidráulica, se utilizan tres tipos de bombas especiales, pertenecientes a diferentes grupos. Estas bombas son:

- ◇ Bomba stratapower de insuficiencia de entrada
- ◇ Bomba stratapower de demanda
- ◇ Bomba Vickers de reducción de recorrido.

Estas bombas tienen un diseño especial, pero su principio de funcionamiento es el mismo de las bombas que se utilizan en circuitos hidráulicos normales. Estas bombas deben tener un alto rendimiento tanto volumétrico como mecánico y por lo tanto total.

Bomba stratapower de insuficiencia de entrada

Esta bomba es movida por el motor del avión o por un motor eléctrico acoplado mediante estrías al eje impulsor del avión. En su mecanismo interior el eje(E) hace girar la leva(D) lo cual hace que los pistones de resorte(G) se muevan hacia atrás y hacia adelante en sus respectivos cilindros dentro del bloque fijo. Los pistones como los de la bomba de pistón de volumen constante. Los discos de fricciones(F) colocados uno a cada lado de la leva(D) permiten que la leva funcione a una temperatura determinada, más baja y más uniforme. Por cada revolución de la leva, es liberado cada pistón dentro del bloque del cilindro. Los pistones se mantienen en contacto con el disco de fricciones mediante resortes y también regresan los pistones después de cada recorrido hacia adelante.

Fig. 19. Bomba stratapower de insuficiencia de admisión.

El rendimiento volumétrico de esta bomba es bastante constante, y para poderlo variar se debe limitar el volumen de fluido tomado por la bomba a medida que aumenta la presión.

Bomba stratapower de demanda

Hay unas cuantas diferencias estructurales que se pueden ver entre estas bombas y las de tipo insuficiencia de admisión. Las partes giratorias que son el eje impulsor(J) la leva y los discos de fricción(H) son casi iguales. Sin embargo, los pistones(A) tienen centros huecos bastante grandes que están conectados con orificios abiertos de una parte a otra. Además, cada pistón tiene una manga(B) alrededor del mismo. Las magas están fijadas una estrella(C) que esta unida al compensador(D) también conocida como válvula de control de volumen; si se aumenta la presión el compensador se mueve hacia la derecha y si se disminuye, la unidad viaja hacia la izquierda por la tensión del resorte de la válvula.

Otra diferencia es que el orificio de retorno esta en el extremo impulsor de la bomba en vez de estarlo en la cabeza.

A medida que se eleva la presión en la tubería, el fluido que fluye por el conducto(G) actúa

sobre el pistón del compensador, forzándolo hacia la derecha y llevando consigo la estrella y las mangas (C) y (B). La rotación de la leva produce una acción de bombeo centrífugo al halar fluido a través de la bomba para enfriamiento y lubricación.

La graduación máxima del compensador se ajusta girando hacia la derecha el tornillo (F) para aumentar la presión y hacia la izquierda para disminuirla.

Bomba Vickers de reducción de recorrido

La bomba de reducción de recorrido tiene básicamente las mismas piezas que la bomba de volumen constante.

Fig. 21. Bomba Vickers de reducción de recorrido

El eje impulsor(A) los pistones(N) y el bloque del cilindro(D), giran. La diferencia principal entre esta bomba y la de volumen constante es que el ángulo entre el eje impulsor y el bloque del cilindro varía automáticamente, mientras que en la bomba de volumen constante el ángulo es fijo.

Una horquilla(C) contiene el bloque del cilindro y gira al rededor de unas clavijas de entrada y salida (O). Antes de que las bombas eleven presión alguna, la horquilla es sostenida en la

posición de flujo total por el resorte que hay en el pistón de control de presión(L). Cuando la presión de salida esta graduada a un máximo predeterminado, el pistón de control se mueve y hace girar la horquilla. Existe también una válvula interna de desahogo, que protege la bomba en caso de que falle la válvula de control de presión.

BIBLIOGRAFIA

- ◇ TYLER G. HICKS, Bombas, Ed. CECSA
- ◇ U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. "Airframe and powerplant mechanics, Airframe handbook". FAA, Oklahoma 1979.
- ◇ OKISHI. "Mecánica de Fluidos". Ed Mc Graw Hill. Barcelona 1999.
- ◇ ROCA, Felip, "Oleohidráulica Básica". Ed. Alfaomega. Barcelona 1999.
- ◇ KENNETH J. Mc NAUGHTON, Bombas Selección, Uso Y Mantenimiento, Ed. Mc.GRAW HILL.–MEXICO, 1988, 373 P.
- ◇ MANUEL VIEJO ZURUCARAY, Bombas: Teoría, Diseño Y Aplicación, Ed. LIMUSA
- ◇ OÑATE, Esteban. "Energía hidráulica" Ed. Paraninfo, Madrid 1992
- ◇ POTTER, Merle. "Mecánica de Fluidos". Ed. Prentice Hall. México 1998
- ◇ Internet.

$$\eta_v = Q_{real} / Q_{teorico}$$

$$\eta_{total} = \eta_{volumetrico} \cdot \eta_{mecanico}$$

$$P_f = \gamma Q h_a$$

$$\eta = \frac{P_f}{W_{efe}} = \frac{\gamma Q h_a / 550}{pf}$$

$$CANP = \frac{p_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{p_v}{\gamma}$$

$$CANP_D = \frac{P_{atm}}{\gamma} - z_1 - h_l - \frac{P_v}{\gamma}$$

$$h_p = z_2 - z_1 + KQ^2$$

◇