

Introducción:

Para que un fluido fluya de un punto a otro en un conducto cerrado o en una tubería, es necesario contar con una fuerza impulsora. Algunas veces, esta fuerza es la gravedad cuando hay diferencias de nivel. Por lo general, el dispositivo mecánico como una bomba o un ventilador, suministra la energía o la fuerza impulsora que incrementa la energía mecánica del fluido. Esta energía se puede usarse para aumentar la velocidad, la presión o elevación del fluido, de acuerdo a la ecuación de Bernoulli que relaciona velocidad con presión, densidad y trabajo. En general, una *bomba* es una máquina o dispositivo que se usa para mover un líquido incompresible, por medio de la adición de energía al mismo.

PARTE 1: TEORIA DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Una bomba es una máquina capaz de transformar energía mecánica en hidráulica. Un tipo de bombas son las centrífugas que se caracterizan por llevar a cabo dicha transformación de energía por medio de un elemento móvil denominado impulsor, rodete o turbina, que gira dentro de otro elemento estático denominado cuerpo o carcasa de la bomba. Ambos disponen de un orificio anular para la entrada del líquido. Cuando el impulsor gira, comunica al líquido una velocidad y una presión que se añade a la que tenía a la entrada.

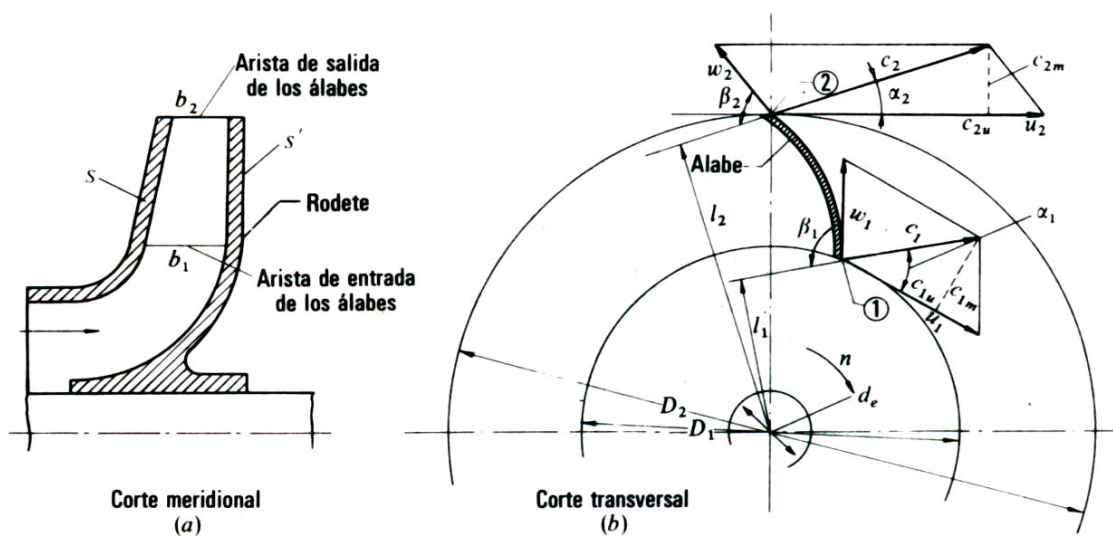
Ecuación fundamental de las turbomáquinas Ecuación de Euler

Figura 1

En la fig. 1 pueden verse los dos planos de representación de una turbo máquina son el plano meridional y el plano transversal, en el plano meridional se representan en su verdadera forma las meridianas de las superficies de revolución de la máquina hidráulica, es decir la parte anterior y posterior del rodete, s y s' en la figura, en este corte se ven también las aristas de los álabes los que imparten energía al fluido. Las aristas son paralelas al eje de la máquina, pudiéndose apreciar los anchos de entrada y salida b_1 y b_2 de los álabes.

En el corte transversal se aprecia el álabe del rodete (en este caso tomamos uno para el estudio) que es una superficie cilíndrica con generatrices paralelas al eje de la máquina, los diámetros de entrada y salida del álabe son D_1 y D_2 , y d_e es el diámetro del eje.

BOMBAS

Supondremos que la bomba funciona en un régimen permanente y que al girar crea una depresión que hace penetrar al fluido en el interior de una bomba con una velocidad relativa de entrada \bar{w}_1 en relación al álabe, si llamamos \bar{c}_1 a la velocidad absoluta de una partícula de fluido a la entrada del álabe y si la velocidad del rodete es $u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60}$, tenemos que las tres

velocidades están relacionadas según la mecánica del movimiento relativo por la ecuación vectorial: $\bar{w}_1 = \bar{c}_1 - \bar{u}_1$

A los efectos de estudiar la máquina se supondrá que el álabe tiene la dirección del vector \bar{w}_1 , con lo que la partícula entra sin choque alguno en el álabe, y la misma sale guiada por el rodete con una velocidad relativa de salida \bar{w}_2 que es tangente al álabe en el punto de salida. En ese punto el álabe tiene una velocidad periférica \bar{u}_2 , de lo que se infiere que la velocidad absoluta de salida será: $\bar{c}_2 = \bar{w}_2 + \bar{u}_2$, por lo tanto la partícula en su paso por el rodete ha sufrido un cambio de velocidades de \bar{c}_1 a \bar{c}_2 .

Sabemos que hubo una variación de la cantidad de movimiento entonces, por lo tanto para una línea de corriente por la que viaja una partícula se tiene: $d\bar{F} = dQ \delta (\bar{c}_2 - \bar{c}_1)$ ¹

Pero si aplicamos momentos desde el centro del eje se tiene $dM = dQ \delta (l_2 c_2 - l_1 c_1)$, donde dM es la resultante de todas las fuerzas que el rodete ha ejercido sobre las partículas que integran la línea de corriente en la cual hubo variación de fuerzas y por lo tanto de momento cinético, dQ es el caudal y $l \times c$ son los brazos de palanca. Supongamos que todas las líneas de corriente sufren la misma variación desde el diámetro de entrada al de salida, y si consideramos que el número de álabes es infinito podemos integrar dM , obteniéndose:

$$M = Q \delta (l_2 c_2 - l_1 c_1)$$

Que es el momento total comunicado al fluido en su paso por el rodete, siendo Q el caudal total que circula por la bomba, además puede verse en la figura 1 que $l_1 = r_1 \cos \alpha_1$ y $l_2 = r_2 \cos \alpha_2$, por lo tanto la ecuación del momento nos queda:

$$M = Q \delta (r_2 c_2 \cos \alpha_2 - r_1 c_1 \cos \alpha_1)$$

Si este momento se multiplica por la velocidad angular ω del rodete (en radianes por segundo), el mismo será igual a la potencia comunicada por el rodete al fluido, por lo tanto: $P_u = M \omega = Q \delta \omega (r_2 c_2 \cos \alpha_2 - r_1 c_1 \cos \alpha_1)$.

Si llamamos Y_u a la energía específica que se intercambia entre el rodete y el fluido, o sea la energía por unidad de masa que el rodete de la bomba comunica al fluido y siendo G el caudal másico que atraviesa el rodete, se tiene:

$$P_u [W] = G \left[\frac{Kg}{s} \right] Y_u \left[\frac{J}{Kg} \right] = Q \left[\frac{m^3}{s} \right] \delta \left[\frac{Kg}{m^3} \right] g \left[\frac{m}{s^2} \right] H_u [m]$$

Donde H_u (m) es la altura equivalente a la energía intercambiada, podemos decir entonces que el fluido adquiere una altura por unidad de masa por unidad de tiempo, esto se puede verificar en las unidades utilizadas, como ser:

$$Y_u \left[\frac{J}{Kg} \right] = Y_u \left[\frac{m^2}{s^2} \right] = g \left[\frac{m}{s^2} \right] H_u [m]$$

Podemos ahora igualar las expresiones de potencias vistas

¹ Nótese que se usa un dF para abarcar todas las fuerzas debidas a la variación de la cantidad de movimiento de todas las partículas.

BOMBAS

$Q \delta \omega (r_2 c_2 \cos \alpha_2 - r_1 c_1 \cos \alpha_1) = Q Y u$, pero sabemos de la fig. 1 que $r_1 \omega = u_1$ y $r_2 \omega = u_2$
por trigonometría: $c_1 \cos \alpha_1 = c_{1u}$ y $c_2 \cos \alpha_2 = c_{2u}$

Donde c_{1u} y c_{2u} son las proyecciones de c_1 y c_2 sobre u_1 y u_2 respectivamente, o sea las componentes periféricas de las velocidades absolutas de entrada, simplificando obtenemos la *Ecuación de Euler*:

$$Y u = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}$$

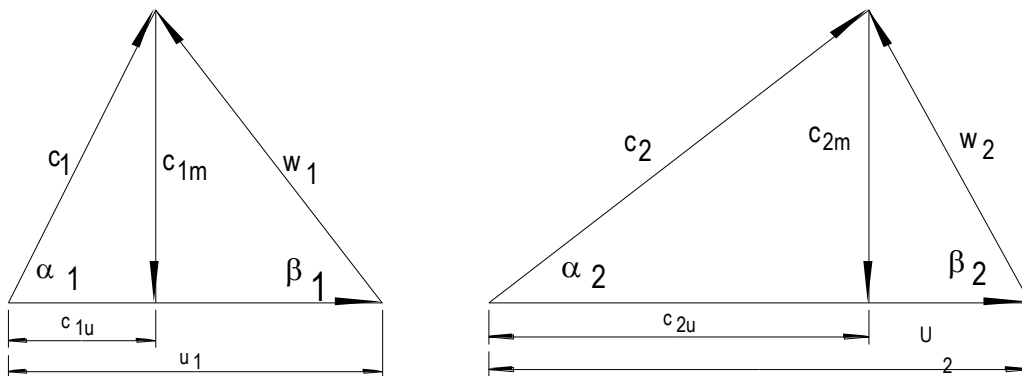
(Ecuación de Euler para bombas centrífugas y ventiladores)

Para obtener la expresión en alturas sólo debemos dividir por la gravedad quedando la expresión

$$H u [m] = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g}$$

Así como la Ec. De Bernoulli es la ecuación fundamental de la hidrodinámica la Ecuación de Euler, es la de las turbomáquinas, el término $H u$ también se llama altura hidráulica. La energía específica representa la energía teórica comunicada al fluido, esta energía o altura es la intercambiada en el rodete.

Triángulos de velocidades:



De las ecuaciones vectoriales de velocidades absolutas $\bar{c}_1 = \bar{w}_1 + \bar{u}_1$ y $\bar{c}_2 = \bar{w}_2 + \bar{u}_2$ podemos representar los triángulos dibujados arriba, de donde podemos deducir trigonométricamente:

Del triángulo de entrada $w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1 c_1 \cos \alpha_1 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1 c_{1u}$

$$u_1 c_{1u} = \frac{1}{2} (u_1^2 + c_1^2 - w_1^2)$$

Del triángulo de salida: $u_2 c_{2u} = \frac{1}{2} (u_2^2 + c_2^2 - w_2^2)$

Llevando estos resultados a la Ecuación de Euler y ordenando términos se deduce la expresión energética de la Ecuación de Euler o segunda forma de la Ecuación de Euler:

$$Y u = - \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} \right)$$

Las unidades del sistema internacional son m^2/s^2

La expresión de alturas es entonces $H u = - \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right)$

BOMBAS

Escribiendo la Ecuación de Bernoulli para una línea de corriente entre la entrada y la salida del rodete y no teniendo en cuenta las pérdidas de altura o pérdidas de carga se tiene:

$$H_u = - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{\gamma} + z_1 - z_2 + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right)$$

Pero según la Ecuación de Euler: $H_u = - \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right)$, igualando ambas expresiones se tiene:

$$- \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right) = - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{\gamma} + z_1 - z_2 + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right)$$

El término $\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$ es evidentemente la altura dinámica que el rodete le da al fluido, por lo tanto podemos decir que

la Altura de Presión del Rodete en función de las velocidades será²:

$$H_p = - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{\gamma} \right) = - \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \right)$$

Y la Altura Dinámica

$$H_d = - \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$$

Grado de Reacción de una bomba:

El grado de reacción de una turbomáquina se refiere al modo cómo trabaja el rodete, en una bomba se debe diferenciar la altura de presión que da la bomba y la altura de presión que da el rodete de la misma, H_p . La primera es mayor puesto que por la influencia de la construcción se transforma la energía dinámica en energía de presión, que sumada a la del rodete constituye toda la energía de la bomba, llamamos Grado de Reacción de una bomba a:

$$\sigma = \frac{H_p}{H_u}$$

Es decir el cociente de la altura que da el rodete en forma de presión y la altura total que da el mismo, en este caso la altura de la Ec de Euler.

El concepto de grado de reacción es aplicable a turbinas, compresores y bombas. Siempre es positivo, y para el caso de máquinas hidráulicas y turbomáquinas se tiene:

1. Si $H_p = 0$ el grado de reacción es cero.
2. Si $0 < H_p < H_u$, el grado está entre cero y uno, que es el caso normal.
3. Si $H_p > H_u$ el grado es mayor a 1

Las máquinas con grado de reacción cero son llamadas de acción, todas las bombas son todas de reacción. Esto quiere decir que si una bomba da la mitad de su energía en forma de presión y la otra en energía dinámica el grado de reacción es de $\frac{1}{2}$.

Efecto del ángulo del álabe en la altura manométrica:

Si despreciamos la cantidad de movimiento angular a la entrada, la altura teórica suministrada al líquido es:

$$H_u \cong \frac{u_2 c_{2u}}{g} \quad (1)$$

² El término $z_1 - z_2$, se desprecia por ser muy pequeño

Donde $c_{2u} = u_2 - c_{2m} \cot \beta_2$ (2)

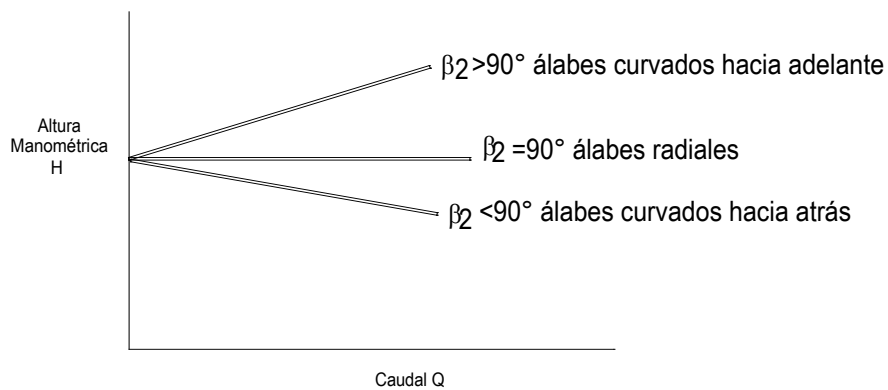
La velocidad de salida normal puede calcularse en función de los parámetros geométricos del rodete, tomando un ancho medio (una medida entre b_1 y b_2) y tomando como hipótesis que el caudal sale por todo el perímetro del rodete en forma normal, por

lo que tendríamos $c_{2m} = \frac{Q}{2\pi r_2 b}$ (3)

Reemplazando y ordenando factores nos queda la expresión de la altura en función del ángulo de salida

$$Hu \cong \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 \cot \beta_2}{2\pi r_2 b} Q$$

La altura manométrica varía con el caudal, siendo el primer termino la altura para el caudal nulo, esta altura se puede graficar y hacerse interesantes observaciones. La pendiente es negativa si $\beta_2 < 90^\circ$ (álabes curvados hacia atrás) y positiva para $\beta_2 > 90^\circ$ (álabes curvados hacia adelante), para las bombas radiales utilizadas para alimentación de calderas humotubulares por ejemplo se tiene que $\beta_2 = 90^\circ$



Curvas características de las bombas y reglas de semejanza:

Dado que en el campo teórico hemos hecho muchas suposiciones, para obtener las características de funcionamiento de una bomba centrífuga, ésta debe ensayarse, para extrapolar los datos necesarios y trazar las graficas correspondientes. Las curvas se trazan a una velocidad de giro en RPM constante, el caudal normalmente es la variable independiente la cual se da en unidades de volumen sobre unidad de tiempo, como variables dependientes se tiene la altura H, la potencia al freno P_f y el rendimiento η .

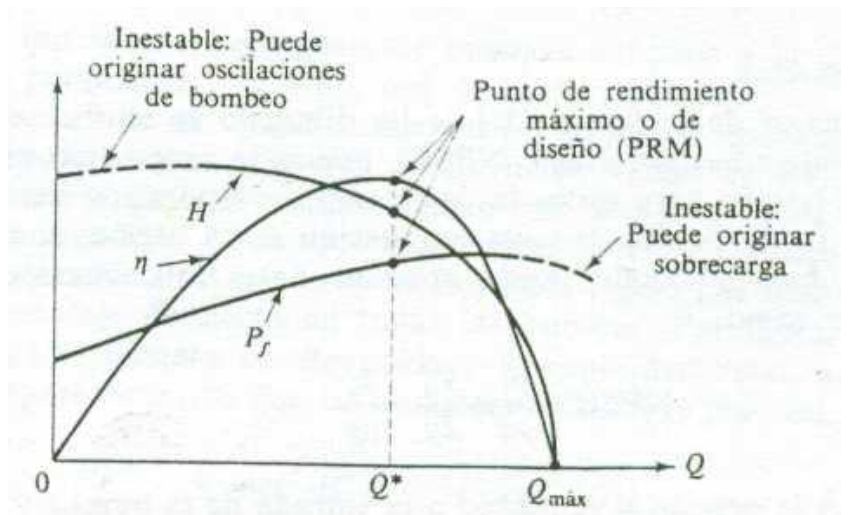


Figura 2

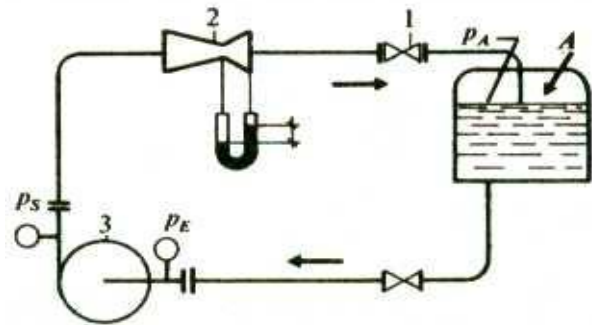
La figura 2 muestra las curvas características típicas de una bomba centrífuga, la altura el aproximadamente constante a caudales bajos y después decrece a caudales altos, a velocidad de giro y tamaño de rotor considerado la bomba no puede suministrar mas que el caudal máximo a una altura mínima. La curva de potencia crece hasta el caudal máximo y luego

BOMBAS

decrece hasta hacerse inestable, el rendimiento crece hasta un máximo y luego decrece en el caudal máximo. Cabe recordar que cada tipo de bomba tiene una curva característica, las cuales son probadas con agua en un banco de prueba de bombas centrífugas, como el mostrado en la Fig. 3

Este banco posee una válvula de regulación 1, un medidor de caudal 2, la bomba a ensayar 3, un tanque A donde se almacena el agua del circuito. A la bomba se le colocan dos manómetros para la medición de la presión de entrada y salida de la bomba

Figura 3



Para una forma de bomba, las variables de salida H y la potencia P dependerán por lo menos del caudal Q , del diámetro del rotor D y de la velocidad del eje n , podemos llegar a las siguientes relaciones funcionales, tomando en consideración otros parámetros como la viscosidad μ , la densidad δ y la rugosidad de la superficie ε :

$$H = f_1(Q, D, n, \delta, \mu, \varepsilon) \quad \text{y} \quad P = f_2(Q, D, n, \delta, \mu, \varepsilon)$$

aplicando los principios del análisis dimensional, se pueden obtener los siguientes números adimensionales

$$\frac{H}{n^2 D^2} = G_1 \left(\frac{Q}{n D^3}, \frac{\delta n D^2}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad \frac{P f}{\delta n^3 D^5} = G_2 \left(\frac{Q}{n D^3}, \frac{\delta n D^2}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D} \right), \text{ de donde podemos definir tres nuevos parámetros}$$

adimensionales

$$\text{Coeficiente de caudal} \quad C_Q = \frac{Q}{n D^3}$$

$$\text{Coeficiente de altura} \quad C_H = \frac{H}{n^2 D^2}$$

$$\text{Coeficiente de potencia} \quad C_P = \frac{P f}{\delta n^3 D^5}$$

Reglas de semejanza:

En el caso de tener dos bombas de la misma familia geométrica y que operan en puntos homólogos puede establecerse para ambas que:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{\delta_2}{\delta_1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5$$

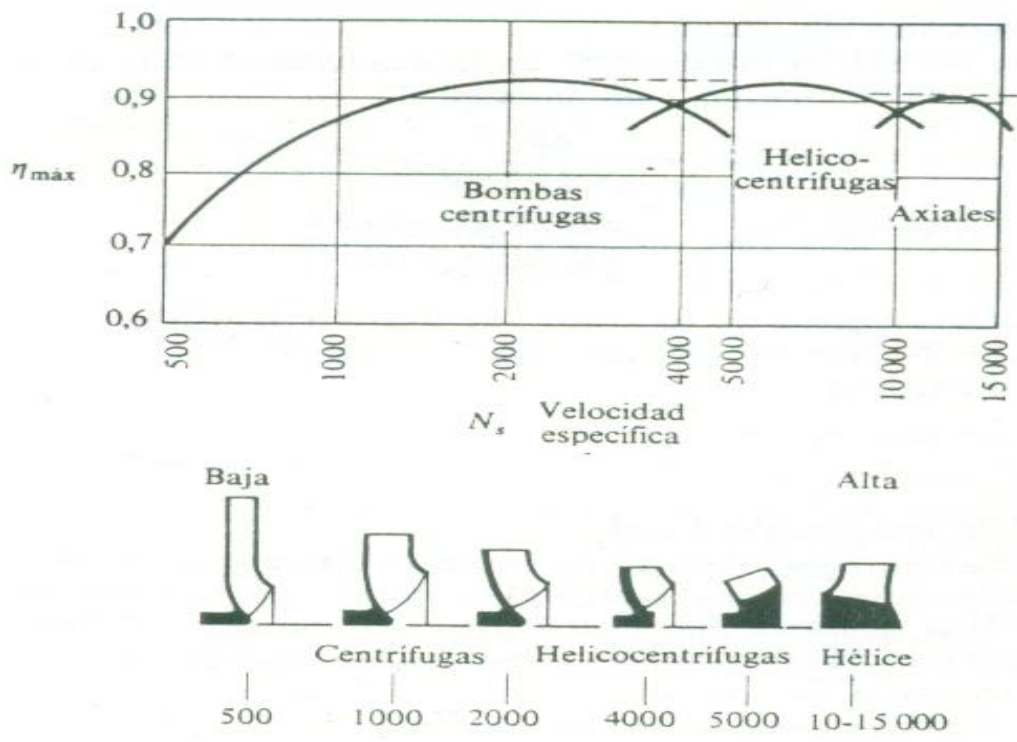
La velocidad específica:

Para ayudar a una mejor selección se utiliza un parámetro llamado Velocidad Específica, este parámetro relaciona la altura y el caudal con el tamaño de la bomba, esta velocidad denominada N_s se consigue trabajando con las reglas de semejanza y la misma se logra trabajado con las reglas de semejanza y los parámetros adimensionales poniendo el número de vueltas en función del caudal, la altura y, sacando el diámetro, la definición es:

$$N_s = \frac{n Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

BOMBAS

El proyectista con N_s selecciona el tipo de bomba más acorde al trabajo a desarrollar, puesto que la velocidad específica está directamente relacionada con el diseño de la bomba más eficiente, como se muestra en la figura a continuación



Vemos que N_s bajos significan Q bajos y H altos, por lo tanto el diseño corresponde a una bomba centrífuga, de lo contrario caudales altos y alturas bajas corresponden a una bomba axial, es interesante observar el cambio de rotor a medida que el N_s aumenta.

Altura Neta Positiva de Aspiración ANPA:

Si A es el nivel del líquido del depósito de aspiración en el cual puede reinar la presión atmosférica, una sobrepresión o una depresión y E la entrada de la bomba se llama Altura de Aspiración al valor H_s , siendo >0 si el eje se encuentra debajo de la superficie de aspiración. La altura total de la bomba referida a Z_E será:

$$H_E = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g}$$

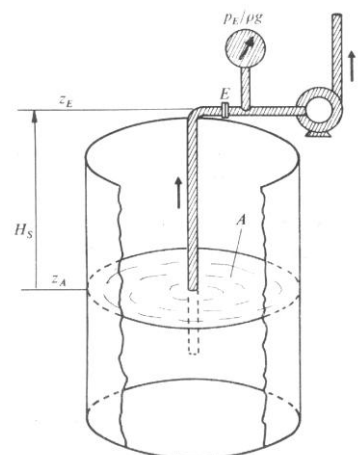
En el interior de la bomba hasta que el líquido llegue al rodete para que se le comunique un incremento de altura, esta altura disminuirá a causa de las pérdidas, si además aumenta la altura la presión p_E disminuirá.

Para que la bomba funcione correctamente esta presión no debe ser nunca menor a la de saturación del líquido (P vapor). En ese instante comienza un fenómeno llamado CAVITACIÓN que se caracteriza por un "golpeteo" intenso dentro de la carcasa, como si la bomba estuviera bombeando "piedras", entonces la altura disponible será:

$$H_{Ed} = \frac{p_E - p_{VAPOR}}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g}$$

superficie del líquido tenemos:

$$\frac{p_A}{\gamma} + Z_A - H_{r\text{succión}} = \frac{p_E}{\gamma} + Z_E + \frac{V_E^2}{2g}$$



BOMBAS

Pero recordando el valor de H_s es: $(Z_E - Z_A)$

Si en ambos miembros de la ecuación anterior $\frac{p_A}{\gamma} - H_s - H_{r\text{succión}} = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g}$ restamos la altura de presión de vapor $\frac{P_{\text{vapor}}}{\gamma}$, tenemos

$$\frac{p_A}{\gamma} - \frac{P_{\text{vapor}}}{\gamma} - H_s - H_{r\text{succión}} = \frac{p_E}{\gamma} - \frac{P_{\text{vapor}}}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} = H_{E\text{Disponible}}$$

$$H_{E\text{Disponible}} = -H_s + \frac{P_A - P_{\text{vapor}}}{\gamma} - H_{r\text{SUCCIÓN}}$$

Esta altura $H_{E\text{Disponible}}$, se conoce como *ALTURA NETA POSITIVA DE ASPIRACIÓN DISPONIBLE*, $ANPA_D^3$. Cuya expresión general a todos los circuitos es:

$$ANPA_{\text{DISPONIBLE}} = \pm Z + \frac{P_A - P_{\text{vapor}}}{\gamma} - H_{r\text{succión}}$$

el término Z es negativo o positivo según se encuentre debajo o arriba del eje de la bomba. La cavitación en la bomba se alcanzará cuando la altura llegue a su valor mínimo posible.

La Altura Neta Positiva de Aspiración Requerida, $ANPA_R$ es un parámetro de cada tipo de bomba, siempre se debe comprobar que el **ANPA REQUERIDO < ANPA DISPONIBLE** para que la bomba no cavite y pierda rendimiento

PARTE 2: Tópicos generales sobre bombas centrífugas

Propiedades de una Bomba Centrífuga:

Dentro del campo normal de aplicación, las propiedades de una bomba centrífuga son:

- Caudal uniforme, sin pulsaciones.
- La presión o altura de elevación disminuye a medida que aumenta el caudal. En general, a partir del punto de funcionamiento, cuando se cierra la válvula de regulación de la tubería de impulsión aumenta la presión y se reduce la potencia. Sin embargo, las bombas de alta velocidad específica (impulsor semi-axial o hélice) no cumplen esta norma general.
- La altura, medida en metros de columna de líquido, a la que eleva una bomba es independiente de la naturaleza del líquido y, por tanto, la altura a la que impele una bomba es la misma, prescindiendo de la influencia que ejerce la viscosidad.
- La potencia absorbida por la bomba es proporcional al peso específico del líquido elevado.
- El par requerido para el arranque de una bomba centrífuga es pequeño y la potencia absorbida durante su funcionamiento de régimen es continua y libre de sobrecargas, cuando la altura no varía y no hay perturbaciones ajenas a la bomba en la aspiración.

Funcionamiento en la industria:

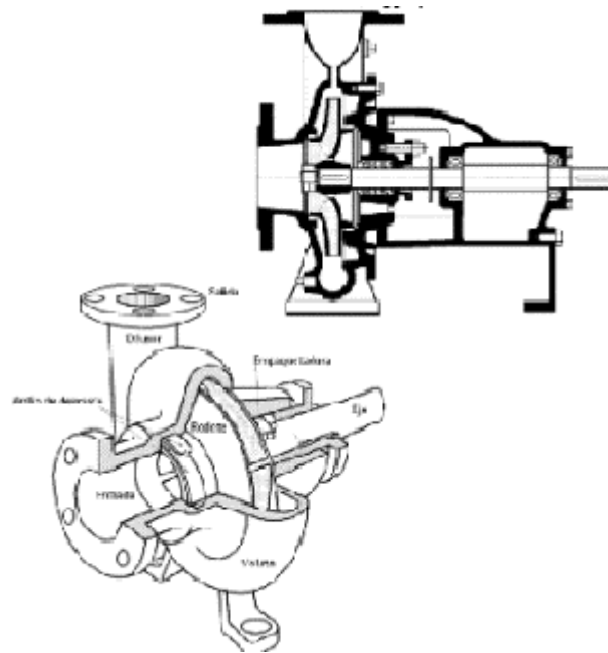
Las bombas centrífugas mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles; son pues, máquinas hidráulicas que transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico. Los elementos constructivos de que constan son:

- Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- 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

³ NPSH (Net Positive Suction Head) en inglés

BOMBAS

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.

BOMBAS

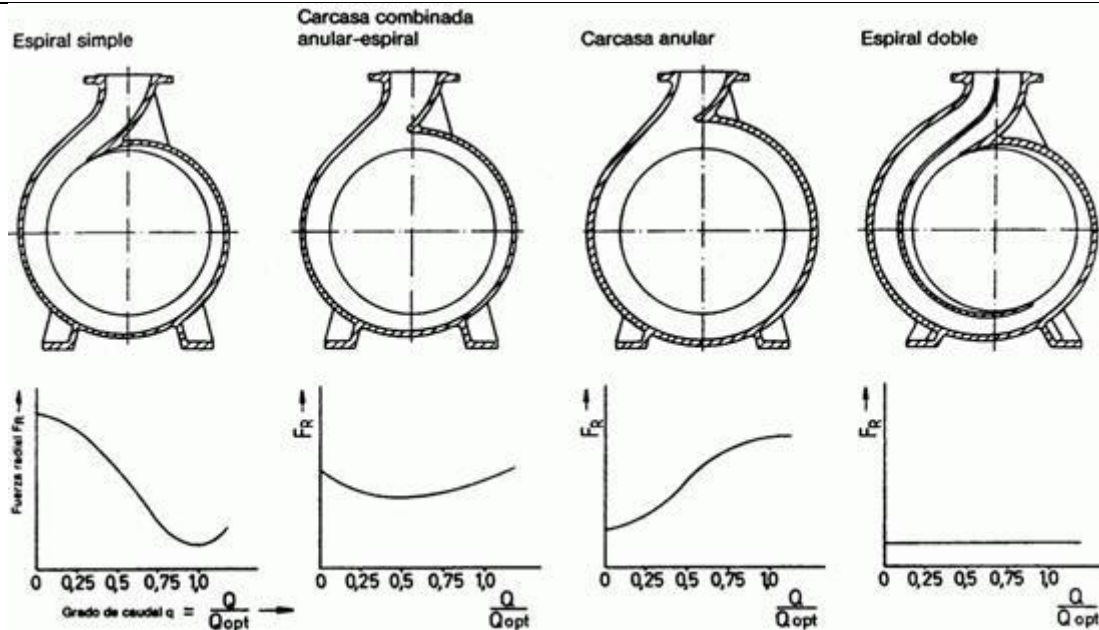


Fig. 27 Variación de la fuerza radial en carcassas espirales

c) 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.

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.

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS BOMBAS:

En la actualidad se encuentran en uso dos tipos de bombas:

- a) De desplazamiento Positivo: i) Reciprocantes ii) Rotatorias
 b) Rotodinámicas: Centrífugas

Las bombas reciprocantes, de desplazamiento positivo, presentan una frontera móvil (pistón) que fuerza al fluido a través de cambios de volumen. Se abre una cavidad (cilindro) y el líquido es entonces "comprimido" saliendo de la cavidad por medio de una válvula de salida. Todas las bombas de desplazamiento positivo producen un flujo pulsátil o periódico. Su mayor ventaja es que pueden manejar cualquier líquido independientemente de su viscosidad.

En las bombas centrífugas la energía se comunica al líquido por medio de álabes en movimiento de rotación, a diferencia de las de desplazamiento volumétrico o positivo rotativas como las de engranajes, tornillos, lóbulos, levas, o las de desplazamiento positivo alternativas de pistón, diafragma etc.

Las ventajas principales de las bombas centrífugas son:

Caudal constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido, bajo mantenimiento y flexibilidad de regulación. Uno de sus pocos inconvenientes es la necesidad de cebado previo al funcionamiento, ya que las bombas centrífugas, al contrario que las de desplazamiento positivo, no son auto aspirantes.

BOMBAS RADIALES, AXIALES Y DIAGONALES

Hemos considerado como bombas centrífugas al conjunto de las propiamente centrífugas o radiales, en las que la energía se cede al líquido esencialmente mediante la acción de la fuerza centrífuga, hasta las axiales, en las que la energía se cede al líquido por la impulsión ejercida por los álabes sobre el mismo.

En las bombas centrífugas radiales la corriente líquida se verifica en planos radiales, en las axiales en superficies cilíndricas alrededor del eje de rotación y en las diagonales se verifica radial y axialmente, denominándose también de flujo mixto. El *tipo* de una bomba, según esta primera clasificación, que atiende al diseño hidráulico del rodete impulsor, viene indicado por su velocidad específica en el punto de máximo rendimiento de la curva característica.

El *número específico de revoluciones* N_s no varía para un impulsor determinado, aunque lo haga su velocidad de giro n , ya que Q y H se modifican también al mismo tiempo.

Cada impulsor tiene una velocidad específica determinada, si bien ésta depende también del sistema difusor. El valor de N_s tampoco cambia al alterar las dimensiones absolutas de un impulsor; todos los impulsores de rendimiento aceptable que tienen una misma velocidad específica son geoméricamente semejantes, aunque pueden tener ligeras variaciones en el ángulo de salida, forma del álabe, etc.

La *velocidad específica del impulsor* es un índice de su geometría y proporciona una idea de sus dimensiones principales, que puede apreciarse en la Fig. 2. La relación entre los diámetros de entrada y salida d_1/d_2 , es (dentro de ciertos límites) directamente proporcional a N_s y era uno de los índices utilizados antes de que se impusiera el concepto de velocidad específica.

La *forma de los álabes* en los impulsores de flujo radial es, en general, curvada hacia atrás con respecto al sentido de giro, $\beta_2 < 90^\circ$, y con superficies de simple curvatura, siendo la generatriz paralela al eje de rotación; en los impulsores helicoidales, los álabes son de doble curvatura y en los axiales tienen, además, un determinado perfil aerodinámico.

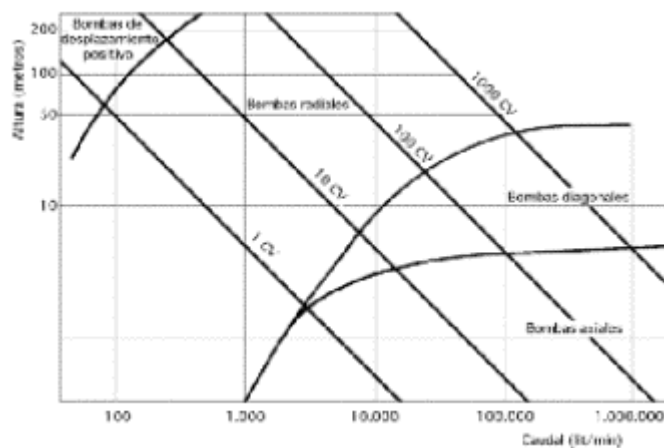


Fig. 2 - Campos de aplicación de los tres tipos de bombas centrífugas

Rendimiento-Velocidad específica:

En el extremo de las N_s bajas, las pérdidas por rozamiento son grandes, de la forma:

- Pérdidas de carga debidas al más largo recorrido interno
- Pérdidas por rozamiento de las paredes del rodete impulsor de gran diámetro al girar en el líquido, (rozamiento del disco).

Las pérdidas por fugas son también grandes. Al crecer la velocidad específica N_s el rendimiento mejora hasta un cierto valor de la misma, por encima del cual, pérdidas superiores de difusión y deficiencia en el guiado del líquido le hacen disminuir de nuevo, aunque de manera más suave. Los rendimientos óptimos se calculan para una velocidad específica N_s del orden de 50,

BOMBAS

Fig. 3, en la que la combinación de las pérdidas descritas, unas decrecientes y otras crecientes con N_s , tiene un efecto mínimo. El que bombas de igual velocidad específica pueda tener rendimientos diferentes, menores para caudales más bajos, se debe a que las leyes de semejanza hidráulica no se cumplen exactamente con tener sólo en cuenta la semejanza geométrica existente.

En la actualidad, las curvas (rendimiento-velocidad específica) se van desplazando paulatinamente en sentido ascendente al ir consiguiendo la técnica bombas cada vez más perfeccionadas.

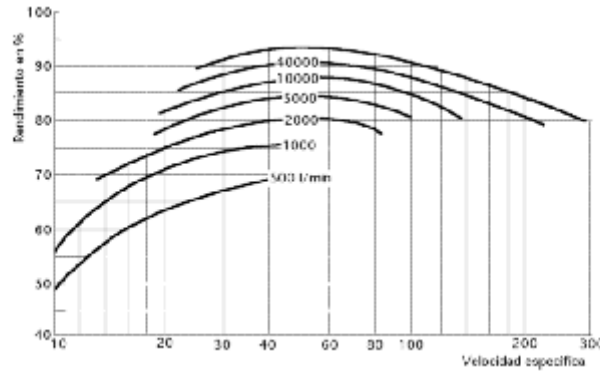


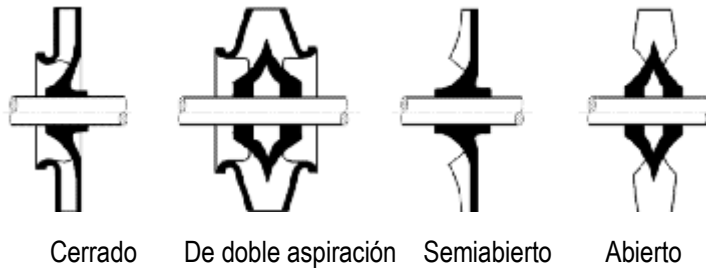
Figura 3 - Relación entre el rendimiento de diversas bombas centrífugas y su velocidad específica

BOMBAS DE IMPULSOR ABIERTO, SEMIABIERTO Y CERRADO

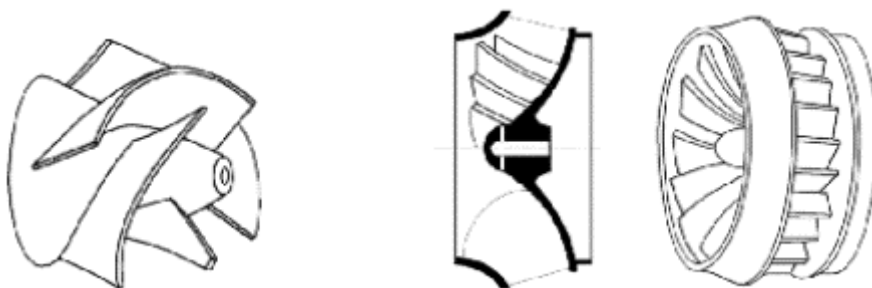
Teniendo en cuenta su diseño mecánico o estructural, se pueden distinguir tres tipos de impulsores:

- a) De álabes aislados (abiertos)
- b) Con una pared o disco lateral de apoyo (semiabiertos)
- c) Con ambas paredes laterales (cerrados)

Esta clasificación es independiente de la más general, que se refiere al tipo de diseño hidráulico, por lo que en esta nueva clasificación puede haber impulsores centrífugos y de flujo mixto, abiertos, semiabiertos o cerrados.



Tipos de impulsores



Rodete de bomba diagonal abierta y rodete de bomba cerrado tipo Francis

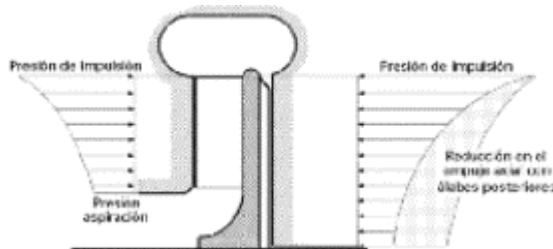
Los impulsores axiales, por su misma estructura, sólo pueden ser semiabiertos o cerrados, ya que sus álabes se pueden considerar como apoyados lateralmente en el eje de rotación, que hace las veces de cubo del impulsor, como si fuese la pared posterior de los radiales y diagonales.

Impulsores abiertos: En un impulsor abierto, los álabes desnudos van unidos únicamente al eje de giro y se mueven entre dos

BOMBAS

paredes laterales fijas pertenecientes a la carcasa de la bomba, con tolerancias laterales lo más estrechas posibles para evitar fugas. Esta construcción es mecánicamente débil, por el largo voladizo en que trabajan los álabes, por lo que estos impulsores disponen siempre de una fracción de pared posterior para dar a los álabes la rigidez necesaria.

En la práctica no se hace distinción entre impulsores abiertos y semiabiertos, designando a ambos como abiertos, en oposición a los cerrados. Los impulsores abiertos se utilizan en algunas bombas radiales pequeñas y para el bombeo de líquidos abrasivos.



Empuje axial en impulsor abierto con álabes posteriores

Impulsores semiabiertos: Los impulsores con una sola pared lateral, que siempre es la posterior, se emplean con cierta frecuencia, destacando las bombas de flujo mixto y todas las axiales. Al igual que en los abiertos, su buen rendimiento está basado en una tolerancia lateral muy estrecha, del orden de 0,3 mm, que evita fugas de la periferia al centro y en los canales del impulsor entre sí. Estas fugas son tanto mayores cuanto menos viscoso es el líquido por lo que con líquidos algo viscosos el caudal y la altura pueden aumentar, a pesar de las mayores pérdidas por rozamiento, lo que les hace más apropiados que los abiertos para trabajar con líquidos a altas temperaturas. Cuando el juego lateral se hace grande por el desgaste, hay que cambiar el impulsor. El desgaste del impulsor es proporcional a la velocidad relativa del líquido y no es radialmente uniforme, sino algo mayor en la periferia. Para el servicio con líquidos abrasivos algunas veces se disponen placas laterales de desgaste de fácil intercambio, construidas con materiales especiales como el acero inoxidable que tiene mayor dureza, que no resulta costoso, ya que el cuerpo de la bomba sigue siendo de fundición.

La escasa tolerancia lateral del impulsor hace que una posible desviación del eje pueda tener graves consecuencias, al igual que las dilataciones o contracciones anormales, que en esta situación tienen mucha mayor importancia que en los impulsores cerrados. El empuje axial en los impulsores abiertos es mayor que en los cerrados, pues la parte anterior está sometida a una presión media menor; para paliar este defecto se les provee de álabes posteriores, que disminuyen en gran manera la presión media en la cara posterior. También sirven para evitar que el líquido quede estancado cerca del eje y empaquetaduras, ya que si aquel fuese abrasivo podría resultar muy perjudicial.

El flujo a través de los agujeros de equilibrio en los impulsores abiertos provistos de álabes posteriores es, a menudo, de sentido contrario al normal en los cerrados, es decir, el líquido entra en ellos del lado de la aspiración.

Las ventajas del impulsor abierto sobre el cerrado son:

- La menor tendencia a obstruirse que le hace adecuado para líquidos sucios
- El menor roce hidráulico del disco, al tener sólo una pared girando, de lo que se deduce un buen rendimiento
- Una mayor accesibilidad de los álabes para el mecanizado, lo que permite conseguir mejores acabados
- Una mayor facilidad de construcción, con modelos más sencillos, por lo que se puede utilizar una mayor variedad de materiales constructivos con un coste menor de fabricación.

Aunque al principio los impulsores se hacían abiertos, de doble aspiración, hoy en día han caído en desuso por dificultades de ajuste y sólo se fabrican los de aspiración simple.

BOMBAS

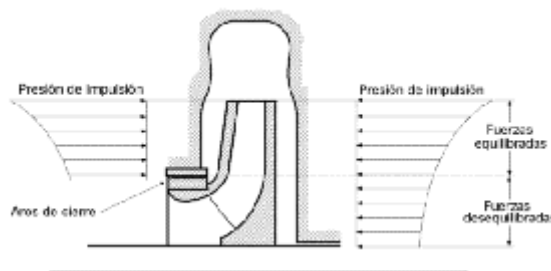
Impulsores cerrados: Los impulsores cerrados tienen los álabes colocados entre dos paredes laterales, anterior o de aspiración y posterior. El estrecho margen de tolerancias existente para evitar fugas de retroceso entre la impulsión y la aspiración suele ser axial y está constituida por unas superficies anulares muy próximas, situadas alrededor del orificio de aspiración (“oído del impulsor”) y formadas por los aros de cierre, uno estacionario montado en el cuerpo y el otro que gira montado en el impulsor



Impulsor de una bomba de torbellino con álabes radiales a ambos lados del disco

La principal ventaja de esta solución es que los aros de cierre se pueden cambiar fácilmente cuando se desgastan, recuperando la tolerancia primitiva, evitando así fugas mayores.

Respecto al desgaste, se pueden hacer de materiales especiales para condiciones de funcionamiento y servicio particularmente duras.



Empuje axial en impulsor cerrado

A menudo, en vez de estos aros dobles se utiliza sólo un aro montado en el cuerpo, de forma que la superficie rozante móvil pertenece al propio impulsor; en estos casos, en el impulsor se deja material suficiente para poder rectificar su superficie desgastada, si procede, cambiando el aro del cuerpo por uno nuevo de diámetro ligeramente diferente, de forma que deje el juego conveniente con el impulsor.

Los impulsores de doble aspiración llevan aros de cierre en los dos oídos; sus ventajas son, ausencia de empuje axial, una menor $NPSH_R$ y una mayor capacidad de aspiración. Se pueden considerar como dos impulsores de aspiración simple, opuestos y en paralelo.

Los impulsores de aspiración simple, cuando están provistos en la parte posterior de cámara de equilibrado del empuje hidráulico axial en comunicación con la aspiración a través de los agujeros de equilibrio, sólo tienen aros a ambos lados, lo que implica una desventaja para el equilibrado que, hidráulicamente, es bastante eficaz.

Los impulsores cerrados pueden resistir mucho mejor cualquier flexión del eje, o contracciones y dilataciones mayores de las previstas, por lo que son más adecuados para servicios de altas temperaturas. Tienen la desventaja de que sus canales son normalmente inaccesibles para cualquier tipo de mecanizado, lo que exige métodos constructivos especiales, más difíciles, con modelos más complicados que en los abiertos. Hidráulicamente, el rozamiento de disco al tener el impulsor dos paredes, es doble que en los abiertos, pero las pérdidas por fugas son menores. La posibilidad de obstrucción con líquidos sucios es mayor y para ello se diseñan impulsores especiales con oído de gran área, canales lo más amplios posibles, pequeño número de álabes, 2 ó 3, y éstos con los bordes de entrada redondeados.