II.- BOMBAS CENTRÍFUGAS

SEMEJANZA Y CLASIFICACIÓN

pfernandezdiez.es

II.1.- RELACIONES DE SEMEJANZA GEOMÉTRICA

Si llamamos n, q, N y C al número de revoluciones por minuto, caudal, potencia y par motor de una bomba *prototipo*, y n', q', N' y C', las correspondientes características de su *modelo*, para una relación de semejanza geométrica $\lambda = \dfrac{D}{D'}$, las ecuaciones generales de semejanza de las bombas son:

a) Para el nº de rpm y la altura manométrica:

$$\left.\begin{array}{l} \text{Prototipo: } u = \xi \sqrt{2\,g\,H_m} = \dfrac{\pi\,D_2 n}{60} \\ \text{Modelo: } u' = \xi \sqrt{2\,g\,H_{m'}} = \dfrac{\pi\,D_{2'} n'}{60} \end{array}\right\} \Rightarrow \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} = \frac{D_2\,n}{D_{2'}\,n'} \;;\; \frac{n}{n'} = \frac{D_{2'}}{D_2} \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} = \lambda^{-1} \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}}$$

b) Para los caudales y la altura manométrica:

$$\left.\begin{array}{l} \text{Prototipo: } q = k_2\,\Omega_2\,c_{2m} = k_2\,\Omega_2\,k_{2m}\sqrt{2\,g\,H_m} \\ \text{Modelo: } q' = k_2\,\Omega_{2'}\,c_{2m'} = k_2\,\Omega_{2'}\,k_{2m}\sqrt{2\,g\,H_{m'}} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{q}{q'} = \frac{\Omega_2}{\Omega_{2'}} \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} = \lambda^2 \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}}$$

c) Para las potencias y la altura manométrica:

$$\left.\begin{array}{l} \text{Prototipo: } N = \dfrac{\gamma\,q\,H_m}{\eta} \\ \text{Modelo: } N' = \dfrac{\gamma\,q'\,H_{m'}}{\eta} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{N}{N'} = \frac{q}{q'}\,\frac{H_m}{H_{m'}} = \lambda^2\,\frac{H_m}{H_{m'}}\sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} = \lambda^2\,\left(\frac{H_m}{H_{m'}}\right)^{3/2}$$

d) Para el par motor y altura manométrica:

$$\left.\begin{array}{l} \textit{Prototipo: } N = C\ w = C\ \dfrac{\pi\ n}{30} \\ \textit{Modelo: } N' = C'\ w' = C'\ \dfrac{\pi\ n'}{30} \end{array}\right\} \quad \Rightarrow \quad \frac{C}{C'} = \frac{N}{N'}\ \frac{n'}{n} = \lambda^2\ (\frac{H_m}{H_{m'}})^{3/2}\ \lambda\ \sqrt{\frac{H_{m'}}{H_m}} = \lambda^3\ \frac{H_m}{H_{m'}}$$

Si se considera a una bomba como semejante a sí misma ($\lambda = 1$) se tiene:

$$\frac{n}{n'} = \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} \quad ; \quad \frac{q}{q'} = \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} \quad ; \quad \frac{N}{N'} = \sqrt{(\frac{H_m}{H_{m'}})^3} \quad ; \quad \frac{C}{C'} = \frac{H_m}{H_{m'}}$$

ecuaciones que ligan en una misma bomba, revoluciones por minuto, caudales, potencias y alturas manométricas; en consecuencia:

$$\frac{n}{n'} = \frac{q}{q'} = \sqrt[3]{\frac{N}{N'}} = \sqrt{\frac{C}{C'}} = \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}}\ ,\ \textit{en la que}: \ \frac{N}{N'} = \frac{\gamma\ q\ H_m}{\gamma\ q'\ H_{m'}} = \frac{n^3}{n'^3}$$

En resumen se puede decir que el número de revoluciones es proporcional al caudal impulsado, a la raíz cuadrada de las alturas manométricas y del par motor, y a la raíz cúbica de la potencia.

II.2.- NÚMERO DE REVOLUCIONES ESPECÍFICO

El número de revoluciones específico de una bomba geométricamente semejante a la que se considera como prototipo, que impulse un caudal de 1 m^3/seg, creando una altura manométrica de 1 metro, se utiliza mucho en los países de habla inglesa, y se representa por n_q; para determinar este número de revoluciones específico, se parte de las ecuaciones de semejanza:

$$\frac{n}{n'} = \lambda^{-1} \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} \quad ; \quad \frac{q}{q'} = \lambda^2 \sqrt{\frac{H_m}{H_{m'}}} \quad ; \quad \frac{N}{N'} = \lambda^2 \sqrt{(\frac{H_m}{H_{m'}})^3}$$

Si se supone una bomba funcionando a n rpm, impulsando un caudal de q m^3/seg, y desarrollando una altura manométrica de H_m metros, y un modelo geométricamente semejante a la anterior que funcione a $n' = n_q$ revoluciones por minuto, desarrollando una altura manométrica $H_{m'} = 1$ metro, e impulsando un caudal $q' = 1\ m^3$/seg, para una relación de semejanza geométrica λ, se tiene:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{n}{n_q} = \lambda^{-1} \sqrt{H_m} \\ q = \lambda^2 \sqrt{H_m} \end{array}\right\} \quad \Rightarrow \quad n_q = n\ \frac{q^{1/2}}{H_m^{3/4}}$$

que es el número de revoluciones específico (americano) de una bomba centrífuga en función del número de revoluciones por minuto n, del caudal impulsado q, y de la altura manométrica H_m en condiciones de rendimiento máximo.

Si se define el número específico de revoluciones de otra forma tal que sea, el número de revoluciones n_s de una bomba modelo que desarrolle una potencia de 1 CV y una altura manométrica H_m, de 1 metro, geométricamente semejante al prototipo considerado, al que se comunica una potencia de N (CV), para desarrollar una altura manométrica de H_m metros, a una velocidad de n, rpm, siendo la relación de semejanza geométrica λ, se tiene:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{n}{n_s} = \lambda^{-1}\sqrt{H_m} \\ N = \lambda^2\ (H_m)^{3/2} \end{array}\right\} \Rightarrow \quad n_s = n\ \frac{\sqrt{N}}{H_m^{5/4}}$$

Para hallar la relación existente entre n_s y n_q se sustituye la expresión de la potencia N de la bomba en n_s, resultando:

$$n_s = n\ \frac{N^{1/2}}{H_m^{5/4}} = \frac{n\ \sqrt{\dfrac{\gamma\ q\ H_m}{75\ \eta}}}{H_m^{5/4}} = \sqrt{\frac{\gamma}{75\ \eta}}\ \frac{n\ \sqrt{q}}{H_m^{3/4}} = \sqrt{\frac{\gamma}{75\ \eta}}\ n_q$$

Para el caso de ser agua el líquido bombeado:

$$\gamma = 1000\ \frac{kg}{m^3} \quad \Rightarrow \quad n_s = 3{,}65\ \frac{n\ \sqrt{q}}{\sqrt{\eta}\ H_m^{3/4}} = \frac{3{,}65}{\sqrt{\eta}}\ n_q$$

se observa que para un caudal y una velocidad de giro determinados, la velocidad específica n_s es función de la altura manométrica H_m.

II.3.- NÚMERO DE REVOLUCIONES ESPECÍFICO EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA; CLASIFICACIÓN

Si en el esquema de rodete de bomba centrífuga de la Fig II.1, D_1 es el diámetro a la entrada, D_2 es el diámetro a la salida, b_2 es la anchura del rodete a la salida, H_m es la altura manométrica desarrollada y $\vec{c}_{2r}$ es la componente radial de la velocidad absoluta del líquido a la salida del rodete Fig II.2, el caudal q impulsado por la bomba es:

$$q = \pi\ D_2\ b_2\ c_{2r}$$

Si llamamos $\vec{c}_2$ a la velocidad absoluta a la salida del rodete, fuera del mismo, $\vec{c}_{2n}$ es la componente rotatoria, $\vec{c}_{2z}$ es la componente axial, $\vec{c}_{2r}$ es la componente radial y $\vec{c}_{2m}$ es la componente meridiana, por lo que:

$$c_2^2 = c_{2n}^2 + c_{2z}^2 + c_{2r}^2 = \left| \ c_{2m}^2 = c_{2z}^2 + c_{2r}^2 \ \right| = c_{2n}^2 + c_{2m}^2$$

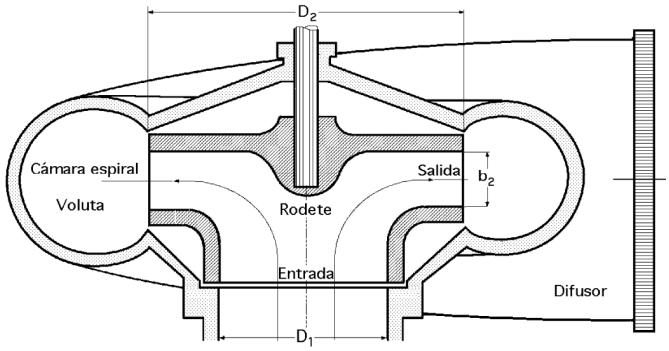


Fig II.1 Esquema de rodete de bomba centrífuga

A la salida del rodete, inmediatamente antes de la salida del líquido a la voluta, se tiene $c_{2z} = 0 \Rightarrow c_{2r} = c_{2m}$, es decir, la velocidad radial a la salida del rodete es igual a la velocidad meridiana a la salida del mismo.

Llamando $k_{2m} = f(q)$ al coeficiente óptimo de la velocidad meridiana $\vec{c}_{2m}$ a la salida, se tiene:

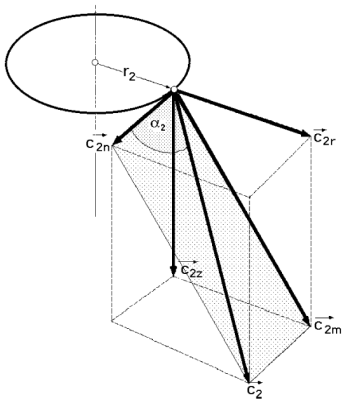


Fig II.2.- Velocidades a la salida en la voluta

$$c_{2r} = c_{2m} = k_{2m}\sqrt{2\,g\,H_m} \quad ; \quad k_{2m} = f(q)$$

que sustituido en el valor de q proporciona la ecuación:

$$q = \pi\, D_2\, b_2\, k_{2m}\sqrt{2\,g\,H_m} = 13{,}88\, D_2\, b_2\, k_{2m}\sqrt{H_m}$$

Por otra parte si $\xi_2 = f(n)$ es el coeficiente óptimo para la velocidad tangencial $\vec{u}_2$, se puede poner:

$$u_2 = \xi_2\sqrt{2\,g\,H_m} = \frac{\pi\, D_2\, n}{60} \quad ; \quad n = 84{,}46\,\frac{\xi_2\sqrt{H_m}}{D_2} \quad ; \quad \xi_2 = f(n)$$

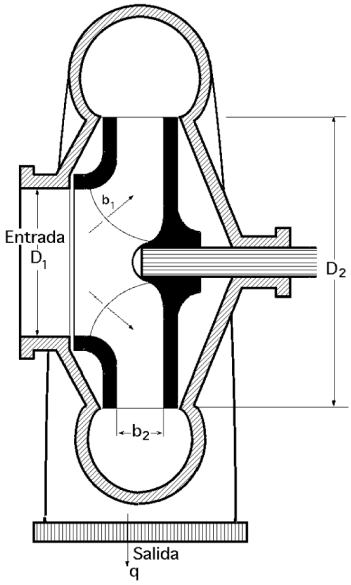
Sustituyendo los valores de n y q en n_q y en n_s se obtiene:

$$n_q = n\,\frac{\sqrt{q}}{H_m^{3/4}} = 315\;\xi_2\sqrt{k_{2m}}\;\sqrt{\frac{b_2}{D_2}} \quad \textit{(Es independiente del líquido)}$$

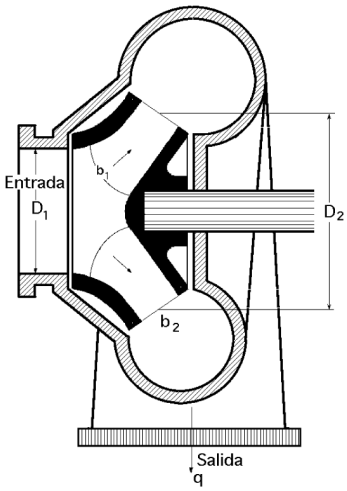
$$n_s = \sqrt{\frac{\gamma}{75\,\eta}}\;n_q = 36{,}4\,\sqrt{\frac{\gamma}{\eta}}\;\xi_2\;\sqrt{k_{2m}}\;\sqrt{\frac{b_2}{D_2}} \quad ; \quad n_{s(agua)} = 1150\,\frac{\xi_2}{\sqrt{\eta}}\;\sqrt{k_{2m}}\;\sqrt{\frac{b_2}{D_2}}$$

Estas ecuaciones limitan el número de revoluciones específico; en efecto, el coeficiente óptimo ξ_2 viene impuesto por la velocidad de giro del motor que acciona la bomba, implicando velocidades tangenciales a la salida del rodete muy altas. El coeficiente óptimo k_{2m} de la velocidad meridiana a la salida del rodete tiene también un valor mínimo, que no se puede reducir, por cuanto viene impuesto por el caudal circulante. En consecuencia, para ir a números de revoluciones específicos bajos, habrá que reducir la relación (b_2/D_2), lo que conduce a un diseño de rodetes con forma de platillos muy aplanados, que tienen grandes diámetros D_2 y pequeñas dimensiones a la salida b_2.

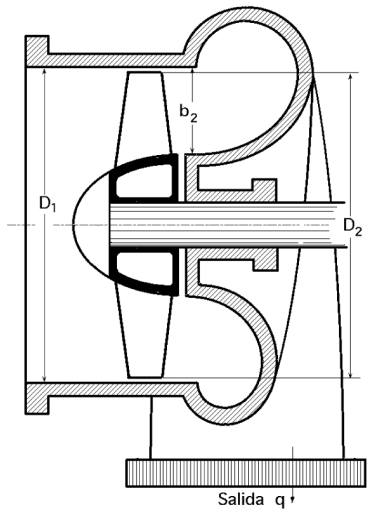
Debido a las limitaciones anteriores relativas a ξ_2 , k_{2m} y (b_2/D_2), resulta que en las bombas centrífugas radiales, para un número específico de revoluciones dado, la altura manométrica creada adquiere un valor máximo que no se puede superar.



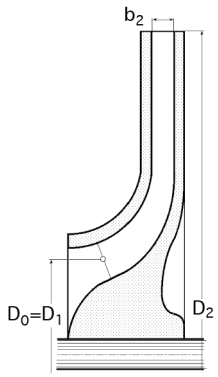
{20 < n_q < 100}, {73 < n_s< 365}
Fig II.3a.- Bomba centrífuga



{100 < n_q < 150}, {365 < n_s < 547,5}
Fig II.3b.- Bomba helicocentrífuga

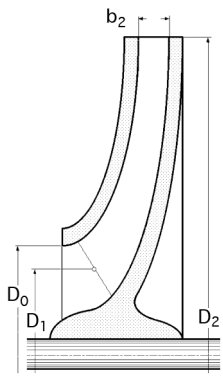


{150 < n_q < 300} {547,5 < n_s < 1095}
Fig II.3c.- Bomba hélice



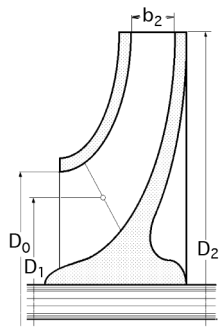
a) Lenta

$n_s \leq 80$; $\frac{D_2}{D_1} = 2{,}2 \div 3{,}5$



b) Normal

$n_s = 80 \div 150$; $\frac{D_2}{D_1} = 1{,}8 \div 2{,}2$



c) Rápida

$n_s = 150 \div 365$; $\frac{D_2}{D_1} = 1{,}3 \div 1{,}8$

Fig II.4.- Alabes de bombas centrífugas radiales; tipos

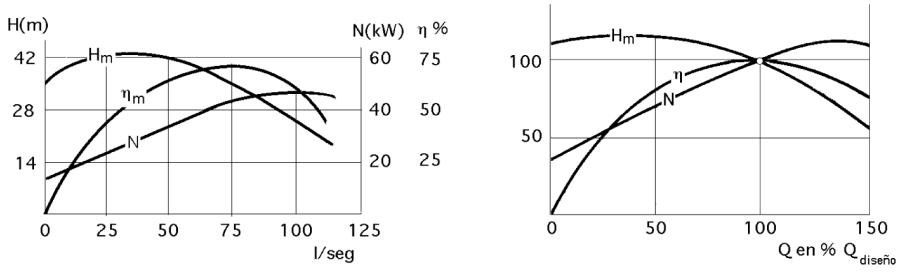


Fig II.5.- a) Curvas características de la bomba radial centrífuga
b) Relación entre las curvas características con los valores de diseño expresados en %

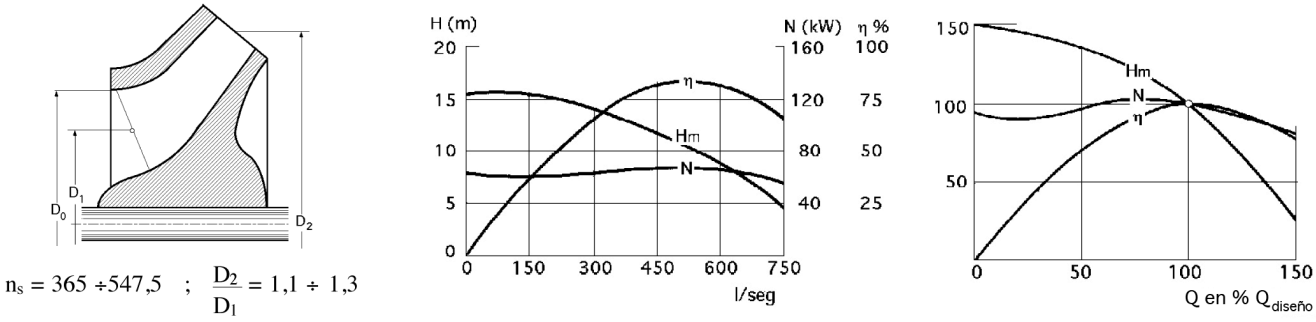


Fig II.6.- Bomba helicocentrífuga.- a) Curvas características de la bomba helicocentrífuga
b) Relación entre las curvas características con los valores de diseño expresados en %

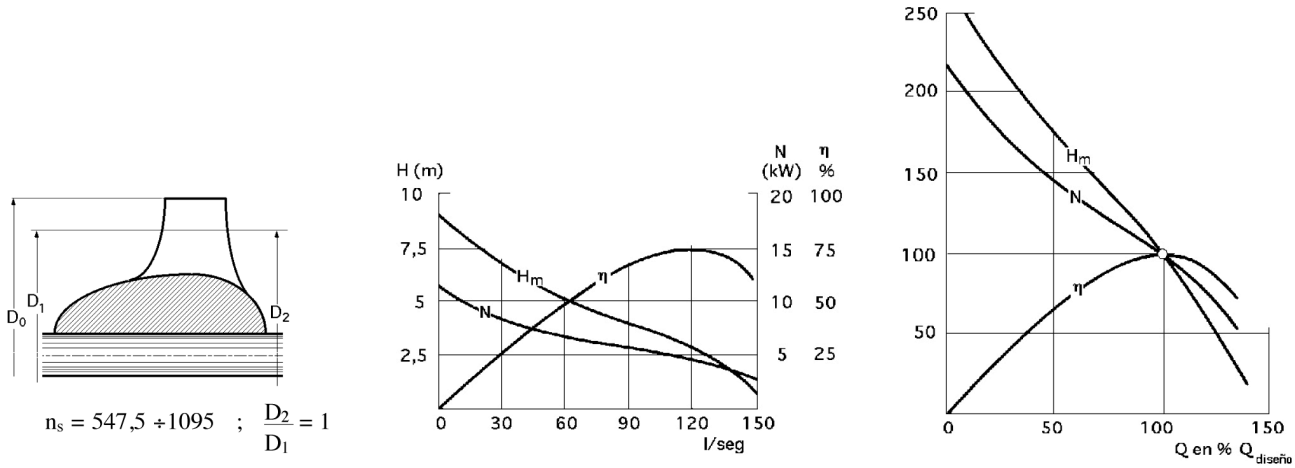


Fig II.7.- Bomba hélice.- a) Curvas características de la bomba hélice
b) Relación entre las curvas características con los valores de diseño expresados en %

En las bombas helicocentrífugas o diagonales, el diámetro de salida D_2 es menor que en las centrífugas radiales por el imperativo de aumentar la relación (b_2/D_2) y conseguir mayores valores del nº específico de revoluciones.

En las bombas hélice (axiales), la relación (b_2/D_2) es mucho mayor que en las anteriores.

II.4.- SEMEJANZA EN BOMBAS PARA CAMPOS GRAVITATORIOS DIFERENTES

Los actuales aplicaciones de dispositivos hidráulicos especiales que se producen en el mundo de la Astronáutica, justifican la necesidad de ampliar las fórmulas de semejanza a diversos campos gravitatorios, de intensidades g y g'.

Si se tienen dos bombas geométricamente semejantes, de relación de semejanza λ, situadas en campos gravitatorios g y g', funcionando a las velocidades n y n', con alturas manométricas H_m y $H_{m'}$, caudales q y q', potencias N y N' y velocidades tangenciales u y u_1, correspondientes a diámetros D y D', respectivamente, resulta:

$$\frac{u}{u'} = \frac{\xi \sqrt{2\,g\,H_m}}{\xi \sqrt{2\,g'\,H_{m'}}} = \frac{\pi\,D\,n}{\pi\,D'\,n'} \quad ; \quad \frac{D\,n}{D'\,n'} = \frac{\sqrt{g\,H_m}}{\sqrt{g'\,H_{m'}}} \quad ; \quad \frac{n}{n'} = \lambda^{-1}\sqrt{\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}}$$

$$\frac{q}{q'} = \frac{\Omega\, c_{2m}}{\Omega'\, c_{2m'}} = \lambda^2\, \frac{k_{2m}\sqrt{2\,g\,H_m}}{k_{2m}\sqrt{2\,g'\,H_{m'}}} = \lambda^2 \sqrt{\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}}$$

Si las bombas impulsan el mismo líquido, siendo γ y γ' su peso específico en los campos gravitatorios g y g', la relación de potencias es:

$$\frac{N}{N'} = \frac{\gamma\, q\, H_m}{\gamma'\, q'\, H_{m'}} = \frac{\rho\, g\, q\, H_m}{\rho\, g'\, q'\, H_{m'}} = \lambda^2 \sqrt{\left(\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}\right)^3}$$

Si se trata de líquidos diferentes de densidades ρ y ρ', los caudales son:

$$\frac{q}{q'} = \frac{\Omega\, c}{\Omega'\, c'} = \lambda^2 \sqrt{\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}}$$

y para las potencias:

$$\frac{N}{N'} = \frac{\gamma\, q\, H_m}{\gamma'\, q'\, H_{m'}} = \frac{\rho\, g\, q\, H_m}{\rho'\, g'\, q'\, H_{m'}} = \frac{\rho}{\rho'}\, \frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}\, \frac{q}{q'} = \lambda^2\, \frac{\rho}{\rho'} \sqrt{\left(\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}\right)^3}$$

Características de una bomba en dos campos gravitatorios diferentes.- En este caso se puede considerar que la bomba es semejante a sí misma, es decir ($\lambda = 1$) por lo que:

$$\frac{n}{n'} = \sqrt{\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}} \quad ; \quad \frac{q}{q'} = \sqrt{\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}} \quad ; \quad \frac{N}{N'} = \frac{\rho}{\rho'} \sqrt{\left(\frac{g\,H_m}{g'\,H_{m'}}\right)^3}$$

$$\frac{q}{q'} = \frac{n}{n'} \quad ; \quad \frac{H_m}{H_{m'}} = \frac{g'\,n^2}{g\,n'^2} \quad ; \quad \frac{N}{N'} = \frac{\rho\, g\, q\, H_m}{\rho'\, g'\, q'\, H_{m'}} = \frac{\rho}{\rho'} \left(\frac{n}{n'}\right)^3$$

que permiten hallar la relación entre caudales, potencias, número de rpm, alturas manométricas, etc, para una misma bomba funcionando en dos campos gravitatorios distintos.

II.5.- APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL A LAS BOMBAS CENTRIFUGAS

Las variables que intervienen en el movimiento de un líquido, a través de los álabes de una bomba centrífuga, pueden relacionarse mediante la siguiente ecuación:

$f(E, D, q, \rho, \eta, n) = 0$, *en la que:*

- $E = g\,H_m$ *es la energía específica*
- D *es el diámetro*
- q *es el caudal bombeado*
- ρ *es la densidad del líquido utilizado*
- η *es la viscosidad dinámica del líquido*
- n *es el número de r.p.m. de la bomba*

Como estas seis variables dependen total o parcialmente de las dimensiones (M, L, t), se pueden obtener (6 - 3 = 3) parámetros π adimensionales.

La matriz correspondiente a estas variables es de la forma:

	E	D	q	ρ	η	n
M	0	0	0	1	1	0
L	2	1	3	-3	-1	0
t	-2	0	-1	0	-1	-1

Podemos tomar, por ejemplo (E, D, ρ) como variables independientes, por cuanto su determinante es distinto de cero:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -3 \\ -2 & 0 & 0 \end{pmatrix} = 2 \text{ , pudiéndose poner que: } \begin{cases} \pi_1 = E^{x_1}\ D^{y_1}\ \rho^{z_1} q = L^{2x_1 + y_1 - 3z_1 + 3}\ T^{-2x_1 - 1}\ M^{z_1} \\ \pi_2 = E^{x_2}\ D^{y_2}\ \rho^{z_2} n = L^{2x_2 + y_2 - 3z_2}\ T^{-2x_2 - 1}\ M^{z_2} \\ \pi_3 = E^{x_3}\ D^{y_3}\ \rho^{z_3} \eta = L^{2x_3 + y_3 - 3z_3 - 1}\ T^{-2x_3 - 1}\ M^{z_3 + 1} \end{cases}$$

y deduciéndose:

$$\left.\begin{array}{l} 2x_1 + y_1 - 3z_1 + 3 = 0 \\ -2x_1 - 1 = 0 \\ z_1 = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow x_1 = -\frac{1}{2}\ ;\ y_1 = -2$$

$$\left.\begin{array}{l} 2x_2 + y_2 - 3z_2 = 0 \\ -2x_2 - 1 = 0 \\ z_2 = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow x_2 = -\frac{1}{2}\ ;\ y_2 = 1$$

$$\left.\begin{array}{l} 2x_3 + y_3 - 3z_3 - 1 = 0 \\ -2x_3 - 1 = 0 \\ z_3 + 1 = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow x_3 = -\frac{1}{2}\ ;\ y_3 = -1\ ;\ z_3 = -1$$

por lo que:

$$\pi_1 = \frac{q}{\sqrt{E}\ D^2} = \frac{q}{\sqrt{g\,H_m}\ D^2} \quad ; \quad \pi_2 = \frac{n\,D}{\sqrt{E}} = \frac{n\,D}{\sqrt{g\,H_m}} \quad ; \quad \pi_3 = \frac{\eta}{\rho\,D\sqrt{E}} = \frac{\eta}{\rho\,D\sqrt{g\,H_m}} = \frac{\upsilon}{D\sqrt{g\,H_m}}$$

Los parámetros adimensionales π_1, π_2 y π_3 permanecen constantes para cada serie de bombas semejantes, funcionando en condiciones dinámicas semejantes.

En consecuencia, a partir de ellos, se pueden obtener otros factores adimensionales comunes a dichas series, mediante los productos de π_1, π_2 y π_3 o cualquier otra combinación de productos de sus potencias, sean estas enteras o fraccionarias, positivas o negativas; así se pueden obtener:

$$\pi_4 = \frac{\pi_1}{\pi_3} = \frac{q}{D^2\sqrt{q\,H_m}}\ \frac{D\sqrt{q\,H_m}}{\nu} = \frac{q}{\nu\,D} \quad \textit{(N° de Re para bombas)}$$

$$\pi_5 = \pi_2\sqrt{\pi_1} = \frac{\sqrt{q}}{D\sqrt[4]{g\,H_m}}\ \frac{n\,D}{\sqrt{g\,H_m}} = \frac{n\sqrt{q}}{(g\,H_m)^{3/4}} \quad \textit{(Velocidad específica)} \quad \Rightarrow \quad n_q = \pi_5\ g^{3/4}$$

$$\pi_6 = \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{q}{D^2\sqrt{g\,H_m}}\;\frac{\sqrt{g\,H_m}}{n\,D} = \frac{q}{n\,D^3} = q_s \quad \textit{(Caudal específico)}$$

II.6.- OTRAS CLASIFICACIONES DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Los principales tipos de bombas centrífugas son: $\begin{cases} \textit{Radiales, axiales y diagonales} \\ \textit{De impulsor abierto, semiabierto y cerrado} \\ \textit{Horizontales y verticales} \end{cases}$

a) BOMBAS RADIALES, AXIALES Y DIAGONALES.- Se ha considerado como bombas centrífugas desde 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 la corriente líquida se verifica en superficies cilíndricas alrededor del eje de rotación*
- *En las diagonales la corriente líquida se verifica radial y axialmente, (flujo mixto)*

El tipo de una bomba que atiende al diseño hidráulico del rodete impulsor, viene caracterizado por su velocidad específica, calculada en el punto de funcionamiento de diseño, es decir, en el punto de máximo rendimiento de la curva característica.

El número específico de revoluciones es constante para un impulsor determinado, para cualquier velocidad de giro n, ya que q y H_m se modifican también al mismo tiempo. Su valor no se modifica al alterar las dimensiones del impulsor, ya que todos los impulsores geométricamente semejantes con un rendimiento aceptable tienen la misma velocidad específica, aunque pueden admitir ligeras variaciones en el ángulo de salida, forma del álabe, etc; el nº específico de revoluciones depende también de la voluta.

La velocidad específica del impulsor es un índice de su geometría y proporciona una idea de sus dimensiones principales, Fig II.8. La relación entre los diámetros de entrada y salida $\frac{D_1}{D_2}$ es (dentro de ciertos límites) directamente proporcional al nº específico de revoluciones, y fue 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 $\beta_2 < 90^o$ 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.

Rendimiento-velocidad específica.- En el límite de las velocidades específicas bajas, las pérdidas por rozamiento son grandes, incluyendo las pérdidas:

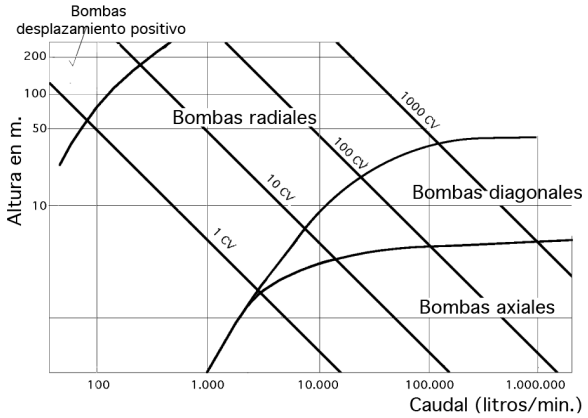


Fig II.8.- Campo de aplicación de los diversos tipos de bombas

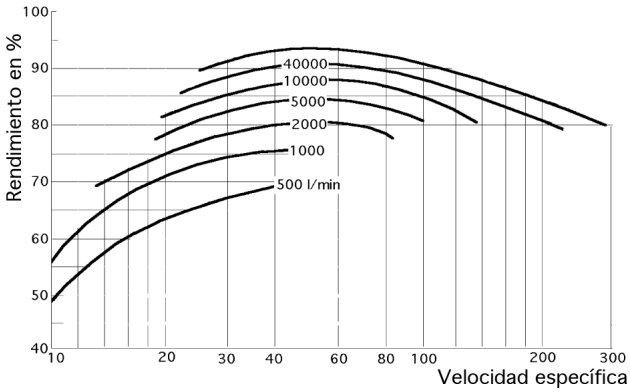


Fig II.9.- Relación entre el rendimiento de diversas bombas centrífugas y su velocidad específica

- *De carga debidas al más largo recorrido interno*

- Por rozamiento de las paredes del rodete impulsor de gran diámetro al girar en el líquido, (rozamiento del disco)

Al crecer la velocidad específica, el rendimiento mejora hasta un cierto valor de la misma, por encima del cual, las pérdidas debidas a deficiencias en el guiado del líquido le hacen disminuir de nuevo, aunque de manera más suave.

Los *rendimientos óptimos* se calculan para una velocidad específica del orden de $n_q = 50 \div 60$, Fig II.9, en la que la combinación de las pérdidas descritas, variables con n_q tiene un efecto mínimo. El que bombas de igual velocidad específica puedan 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. Las curvas *(rendimiento-velocidad específica)* se han ido desplazando, con el tiempo, en sentido ascendente (mayores rendimientos) a medida que las técnicas utilizadas en su fabricación se han ido perfeccionando.

BOMBAS DE IMPULSOR ABIERTO, SEMIABIERTO Y CERRADO.- Según su diseño mecá-nico o estructural, se pueden distinguir tres tipos de impulsores:

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

Esta clasificación es independiente de la anterior, 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.

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.

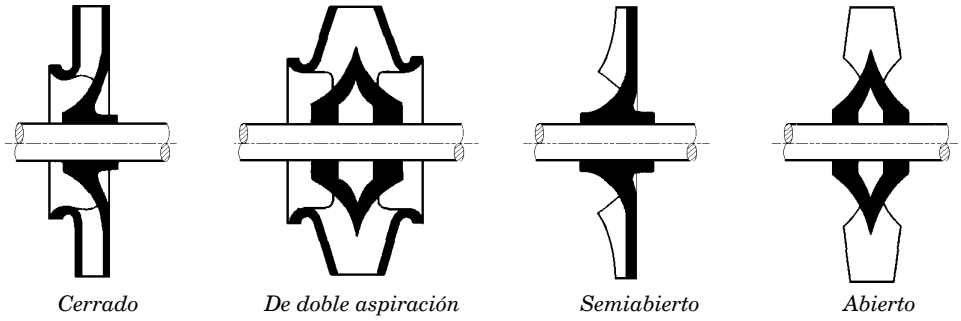


Fig II.10.- Tipos de impulsores

a) Impulsores abiertos.- En un impulsor abierto, los álabes desnudos van unidos únicamente al eje de giro y se mueven entre dos paredes laterales fijas pertenecientes a la carcasa de la bomba, con tolerancias laterales lo más estrechas posibles para evitar fugas.

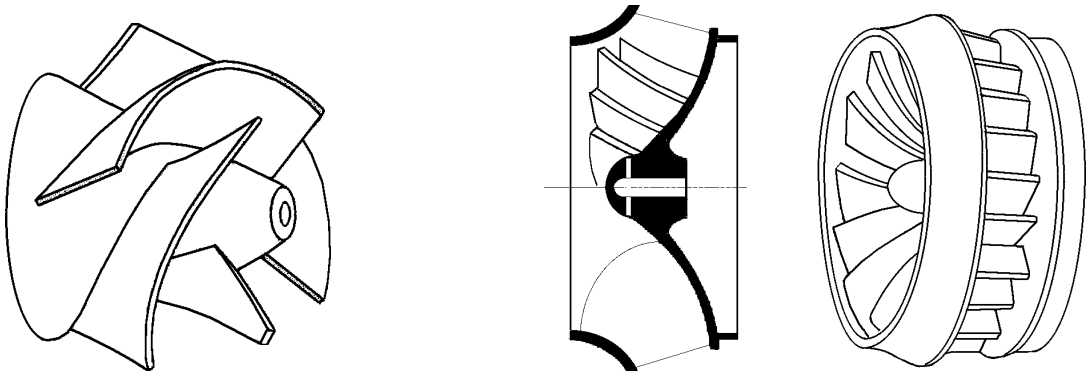


Fig II.11.- Rodete de bomba diagonal abierta y rodete de bomba cerrado tipo Francis

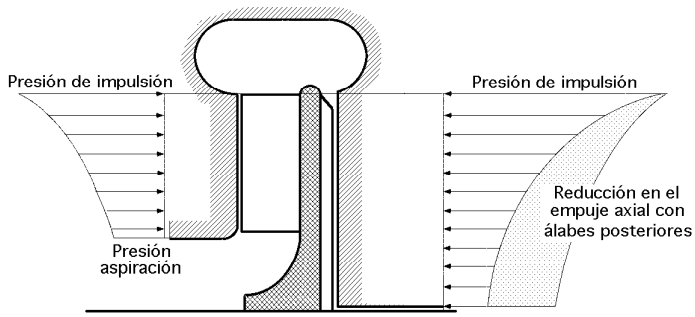


Fig II.12.- Empuje axial en impulsor abierto con álabes posteriores

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, Fig II.12. 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.

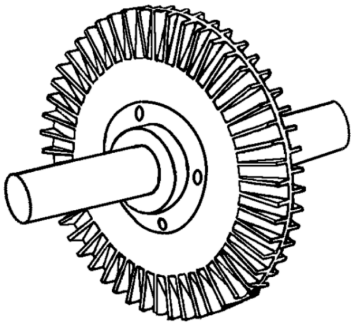


Fig II.13.- Impulsor de una bomba de torbellino con álabes radiales a ambos lados del disco

b) 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.

El desgaste del impulsor es proporcional a la velocidad relativa del líquido y no es radialmente uniforme, sino algo mayor en la periferia; cuando el juego lateral se hace grande por el desgaste, hay que cambiar el impulsor. 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 la carcasa 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 Fig II.12, 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 el líquido fuese abrasivo podría resultar muy perjudicial.

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.

c) Impulsores cerrados.- Los impulsores cerrados tienen los álabes colocados entre dos paredes laterales, anterior o de aspiración y posterior, Fig II.14. 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 montado en la carcasa y el otro que gira montado en el impulsor. 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.

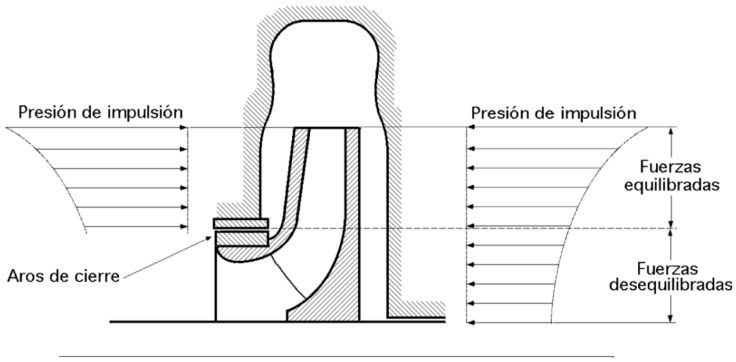


Fig II.14.- Empuje axial en impulsor cerrado

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

A menudo, en vez de estos aros dobles se utiliza sólo un aro montado en la carcasa, 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 de la carcasa por uno nuevo de diámetro ligeramente diferente, de forma que deje el juego conveniente con el impulsor. 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 que en los abiertos.

Hidráulicamente, el rozamiento de disco al tener el impulsor dos paredes, es doble que en los abiertos, pero las pérdidas volumétricas 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.

d) Impulsores de aspiración doble.- 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 una cámara de equilibrado del empuje hidráulico axial en comunicación con la aspiración a través de los aguje-

ros de equilibrio, sólo tienen aros a ambos lados, lo que implica una desventaja para el equilibrado que, hidráulicamente, es bastante eficaz.

BOMBAS HORIZONTALES Y VERTICALES.- El eje de rotación de una bomba puede ser horizontal o vertical, (rara vez inclinado). De esta disposición se derivan diferencias estructurales en la construcción de la bomba que a veces son importantes, por lo que también las aplicaciones de los dos tipos de construcción suelen ser, a menudo, distintas y bien definidas.

a) Bombas horizontales.- La disposición del eje de giro horizontal presupone que la bomba y el motor se hallan a la misma altura; éste tipo de bombas se utiliza para funcionamiento en seco, exterior al líquido bombeado que llega a la bomba por medio de una tubería de aspiración. Las bombas centrífugas, sin embargo, no deben rodar en seco, ya que necesitan del líquido bombeado como lubricante entre aros rozantes e impulsor, y entre empaquetadura y eje.

Como no son autoaspirantes requieren, antes de su puesta en marcha, el estar cebadas; ésto no es fácil de conseguir si la bomba no trabaja en carga, estando por encima del nivel del líquido, que es el caso más corriente con bombas horizontales, siendo a menudo necesarias las válvulas de pie, (aspira-ción), y los distintos sistemas de cebado.

Como ventajas específicas se puede decir que las bombas horizontales, (excepto para grandes tamaños), son de construcción más barata que las verticales y, especialmente, su mantenimiento y conservación es mucho más sencillo y económico; el desmontaje de la bomba se suele hacer sin necesidad de mover el motor y al igual que en las de cámara partida, sin tocar siquiera las conexiones de aspiración e impulsión.

b) Bombas verticales.- Las bombas con eje de giro en posición vertical tienen, casi siempre, el motor a un nivel superior al de la bomba, por lo que es posible, al contrario que en las horizontales, que la bomba trabaje rodeada por el líquido a bombear, con el motor por encima de éste.

b1) Bombas verticales de funcionamiento en seco.- En las bombas verticales no sumergidas, el motor puede estar inmediatamente sobre la bomba, o muy por encima de ésta. El elevarlo responde a la necesidad de protegerlo de una posible inundación o para hacerlo más accesible si, por ejemplo, la bomba trabaja en un pozo. El eje alargado puede ser rígido o flexible por medio de juntas universales, lo que simplifica el siempre difícil problema del alineamiento.

Se emplean muy a menudo las mismas bombas horizontales modificadas únicamente en sus cojinetes. La aspiración es lateral, (horizontal); en las bombas grandes, frecuentemente, es por abajo, aunque a veces se transforma en lateral mediante un simple codo.

La ventaja de las bombas verticales, es que requieren muy poco espacio horizontal que las hace insustituibles en barcos, pozos, etc; sin embargo se necesita un espacio vertical superior suficiente

para permitir su cómodo montaje y desmontaje.

Para bombas de gran caudal, la construcción vertical resulta en general más barata que la horizontal. Las bombas verticales se emplean normalmente en aplicaciones marinas, para aguas sucias, drenajes, irrigación, circulación de condensadores, etc.

b2) Bombas verticales sumergidas.- El funcionamiento sumergido de las bombas centrífugas elimina el inconveniente del cebado, por lo que el impulsor se halla continuamente, aún parado, rodeado por el líquido a impulsar y, por lo tanto, la bomba está en disposición de funcionar en cualquier momento. El control de la unidad requiere únicamente la puesta en marcha del motor de accionamiento, sin necesidad de dispositivos adicionales de cebado previo.

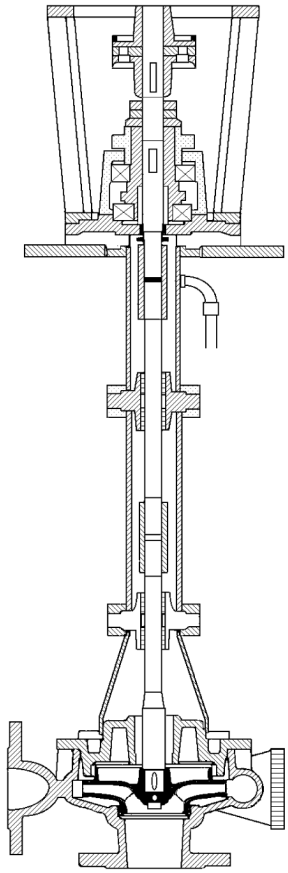


Fig II.15.- Bomba de eje vertical

La aspiración, que es siempre por abajo, Fig II.15, se hace a una cierta profundidad con respecto al nivel libre del líquido. Si esta profundidad es menor de lo debido, 2 ó 3 veces el diámetro del orificio de aspiración, se pueden crear en la superficie vórtices o remolinos por cuyo centro se introduce aire en la bomba, con la consiguiente pérdida de caudal y deficiente funcionamiento.

El eje del que van provistas estas bombas, va guiado normalmente por cojinetes de fricción separados a intervalos regulares de 1,5÷ 3 m. y lubricados por aceite, grasa, o el mismo líquido bombeado; en este último caso, el eje se suele disponer en el interior de la tubería de impulsión vertical, cerca del motor, en que ésta se desvía horizontalmente mediante un codo adecuado.

En los casos de lubricación por grasa o aceite, el eje va dentro de un tubo portador de los cojinetes, siendo este conjunto, a su vez, exterior o interior a la tubería de impulsión.

La otra solución tiene la ventaja de requerir un menor espacio, siendo en ambos casos innecesaria la empaquetadura, lo que constituye también una circunstancia muy favorable, dados los inconvenientes que ésta lleva a veces consigo.

Las bombas sumergidas tienen la ventaja de ocupar un espacio horizontal mínimo, sólo el necesario para acomodar el motor vertical y la impulsión, siendo incluso ésta a veces subterránea.

Las ventajas hidráulicas son evidentes al desaparecer todos los problemas de aspiración que constituyen el principal inconveniente en el funcionamiento de las bombas centrífugas.

Desde un punto de vista mecánico, esta disposición presenta grandes inconvenientes con respec-

to a la horizontal. Las bombas son inicialmente más caras y su mantenimiento mucho más elevado, ya que cualquier reparación exige el desmontaje de la bomba para izarla a la superficie.

El eje alargado, somete a los cojinetes a un trabajo duro que sobre todo, si están lubricados por agua o líquidos sin grandes propiedades lubricantes, hace que su vida sea corta e imprevisible.

Los tipos más importantes de bombas verticales sumergidas son:

- Las bombas de turbina verticales o de pozo profundo
- Las bombas de hélice

b3) Bombas de turbina verticales.- Entre las bombas sumergidas, las más importantes son las llamadas de pozo profundo, de sondeo o de turbina vertical, que fueron desarrolladas para la explotación de pozos, perforaciones y sondeos de diámetro reducido, lo que limita la altura por etapa, e implica la utilización de bombas multicelulares para reducir el espacio. El impulsor de aspiración simple, puede ser radial o diagonal, según las condiciones de servicio y su construcción cerrada o semiabierta. Los impulsores semiabiertos, sin embargo, aparte de su mayor empuje axial, hasta el 50% mayor, requieren un ajuste vertical más cuidadoso durante el montaje. El conjunto de difusores de la bomba y la tubería de impulsión, cuelgan del cabezal sobre el que va montado el motor.

A veces, los difusores se recubren interiormente de un esmalte especial que disminuye la rugosidad de la fundición y las pérdidas hidráulicas consiguientes, aumentando el rendimiento, dotando de una cierta uniformidad a las distintas unidades, lográndose una mejor resistencia a la corrosión y a la abrasión. La construcción de estas bombas permite montar el número de etapas deseado, que puede llegar a 20 o más, añadiendo difusores e impulsores semejantes uno sobre otro, lo que dota de cierta elasticidad a las aplicaciones, con las consiguientes ventajas de estandarización, disponibilidad de repuestos, etc; no obstante, estas bombas participan de las desventajas mencionadas para las bombas verticales sumergidas, de ser caras y exigir unos costes de mantenimiento elevados.

Las bombas verticales de turbina han llegado a un grado de perfección notable con rendimientos altos y determinadas ventajas hidráulicas; aunque empezaron siendo empleadas exclusivamente para riegos en pozos y perforaciones, sus aplicaciones industriales aumentan cada vez más, siendo en la actualidad más numerosas que las agrícolas, por lo que la denominación de bombas de pozo profundo va desapareciendo para adaptarse a la de bombas de turbina vertical.

Dentro de este tipo se pueden distinguir las bombas provistas de eje alargado y accionadas por motor sumergible dispuesto inmediatamente por debajo de la bomba o bombas buzo.

b4) Bombas de turbina verticales con el motor por encima.- En estas bombas, el eje va por el interior de la tubería de impulsión, desnudo si la lubricación es por aceite, o dentro de un tubo protector si la lubricación es por agua de una fuente externa. El conjunto de impulsores y eje soportado por los cojinetes de empuje están colocados en el mismo cabezal o en la parte superior del motor, si

su eje y el de la bomba están rígidamente acoplados (motores de eje hueco).

Con estas bombas se pueden alcanzar unos 200 m.c.a., pero los problemas que ocasionan las imperfecciones en la rectitud del eje, influyen en gran manera en la vida de los cojinetes y en las vibraciones durante el funcionamiento, que crecen en gran manera con la longitud del eje.

b5) Bombas de turbina verticales con el motor sumergido.- Con objeto de evitar las desventajas que se derivan de la excesiva longitud del eje, en las bombas sumergidas se han desarrollado motores eléctricos capaces de funcionar rodeados de líquido y de dimensiones tales que les permite ir montados en el interior del pozo. De esta forma, colocando los motores inmediatamente por debajo de la bomba, desaparece la necesidad del eje, cojinetes y tubo protector, por lo que la tubería de impulsión puede ser de menor diámetro para pérdidas de carga semejantes.

Los motores pueden ser de funcionamiento en seco con cierre hermético, o inundados, en cuyo caso los aislamientos tienen características muy especiales. Las ventajas del motor sumergido se hacen apreciables, sobre todo, en pozos muy profundos de más de 30 m, o bien inclinados o curvados. El espacio requerido en la superficie es, evidentemente mínimo e incluso nulo con descarga subterránea.

Las desventajas son un menor rendimiento y menor vida del motor y la necesidad ineludible del desmontaje total para cualquier revisión o reparación de la bomba o del motor.

b6) Bombas verticales de hélice.- Para manejar grandes caudales con pequeñas alturas se usan, a menudo, bombas hélice en posición vertical y funcionamiento sumergido. La simplicidad de estas bombas llega algunas veces a ser máxima, consistiendo sólo en el impulsor axial abierto provisto de un eje vertical, que gira dentro de la tubería de impulsión. A veces pueden llevar un difusor o algunos álabes directores; a la entrada se pueden disponer también álabes directores con objeto de evitar o reducir una prerotación excesiva de la vena líquida en la aspiración, que puede dar lugar a remolinos o vórtices en la superficie del líquido. El eje puede estar lubricado por aceite, en cuyo caso va dispuesto dentro del correspondiente tubo protector con los cojinetes de apoyo.

El impulsor puede ir en voladizo o bien tener un cojinete inferior, que aunque constituye un pequeño estorbo para la aspiración, tiene un papel importante dada la estrecha tolerancia radial entre el impulsor y la tubería que le rodea.