

CAPÍTULO 1

Clasificación de las bombas y variables principales

Cecilia Lucino

Introducción

Se tienen registros de la utilización de ruedas hidráulicas para transportar agua para riego, de la época de los antiguos egipcios, más de 2000 años atrás. Por otra parte Arquímedes, por los años 200 A.C., inventaba una bomba en forma de tornillo sin fin, que se dio en llamar 'Tornillo de Arquímedes' y que se utilizó para drenar e irrigar las tierras de la planicie del río Nilo (Paresh, 2005). Esta bomba aún es utilizada, y lo es también como turbina (generando energía). Las bombas primitivas servían para desplazar y trasladar volúmenes, lo que las ubica en el grupo de las bombas de desplazamiento positivo.

Inicialmente usadas para la agricultura, a lo largo del tiempo, estas bombas comenzaron a aplicarse a otros usos, siempre a partir del mismo principio fundamental: gastar energía para elevar, transportar o comprimir líquidos. Actualmente su uso se extiende a una gran cantidad de actividades: provisión de agua para consumo, drenaje en áreas urbanas y rurales, manejo de efluentes urbanos e industriales, industria química, del petróleo, farmacéutica, en sistemas de enfriamiento de plantas generadoras, en la industria de la construcción y muchas otras actividades que requieren el manejo de fluidos. También su uso se extiende a la transferencia de materia orgánica, como peces, papas, granos, etc. Tal vez el ejemplo más evidente de la diversidad y potenciales usos que tienen las bombas de este tipo es el caso del corazón artificial, que es una bomba que responde a este principio de operación de desplazamiento positivo.

En este libro estudiaremos las bombas centrífugas, también llamadas bombas rotodinámicas. Algunos atribuyen la invención de este diseño a Leonardo Da Vinci (1452–1519) por haber sido quien sugirió la idea de utilizar la fuerza centrífuga para impulsar líquidos; otros a Johann Jordan, por el año 1680, aunque la mayoría adjudica el origen del impulsor centrífugo a Denis Papin en 1689 (Engeda, 1998). Más tarde, en 1750, Leonhard Euler (Van Esch, B.1997) aportó la ecuación fundamental de las turbomáquinas hidráulicas, que explica el principio de funcionamiento de las bombas centrífugas, que se desarrollará en el Capítulo 5.

Clasificación de las máquinas hidráulicas

Las bombas se pueden clasificar en función de las aplicaciones a las que sirven, los materiales con los que están construidas, los líquidos que manejan e incluso su orientación en el espacio. Otra manera de plantear la clasificación es de acuerdo al principio por el cual se entrega energía al fluido. Esto nos lleva a diferenciar las bombas a) rotodinámicas o 'dinámicas' de las b) de desplazamiento positivo (Karassik et al., 1976). Las bombas rotodinámicas, junto con las turbinas hidráulicas son llamadas también turbomáquinas hidráulicas (TMH). En las bombas rotodinámicas la energía se entrega continuamente para aumentar las velocidades del fluido dentro de la máquina a valores mayores que los que ocurren en la entrada, luego, se provoca una reducción de la velocidad a la salida, que produce un aumento de presión. En las de desplazamiento positivo, en cambio, la energía se agrega periódicamente mediante la aplicación de fuerza a uno o más límites móviles de un cierto número de volúmenes cerrados que contienen líquido, lo que da como resultado un aumento directo de la presión hasta el valor requerido para mover el líquido hacia la línea de descarga.

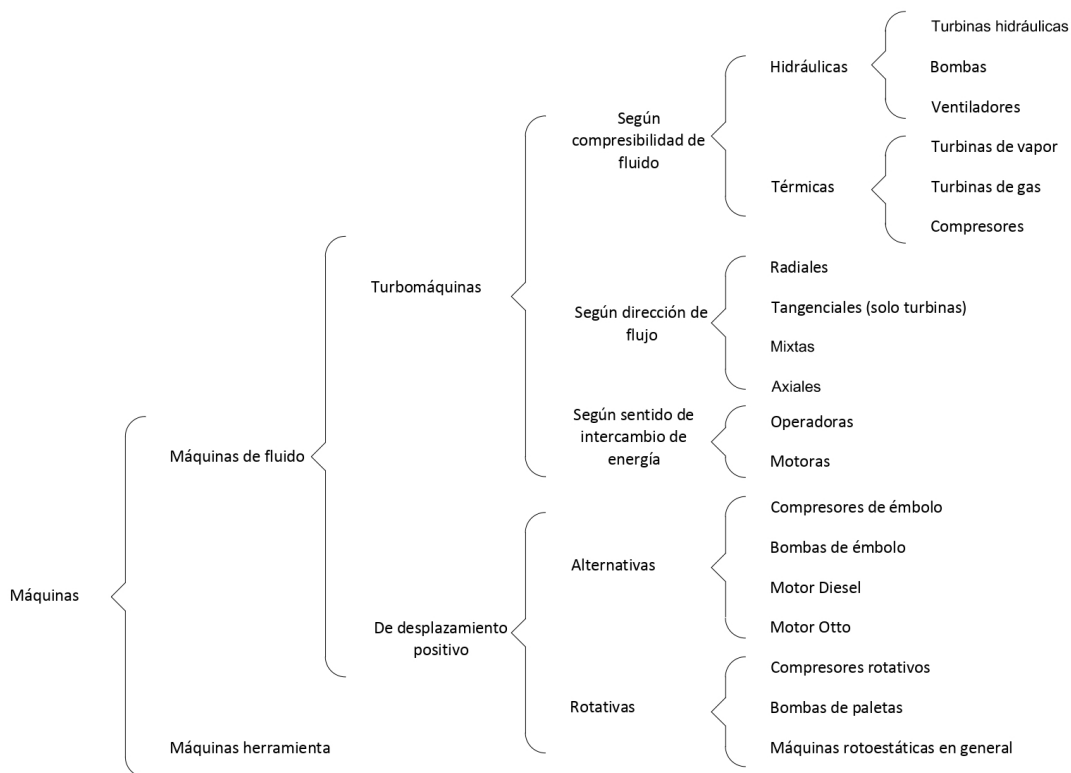


Figura 1.1: Clasificación de las máquinas

Utilizando el principio de funcionamiento como base para la clasificación de las máquinas (que son arreglos de objetos que tienen por finalidad realizar trabajo), tendríamos una primera división entre las máquinas-herramienta y las máquinas de fluido (Fig. 1.1). En las primeras se utiliza energía motriz, generalmente eléctrica, para modificar la forma de objetos sólidos, como, por ejemplo, fresadoras, taladros, máquinas de control numérico computarizado, etc. Las máquinas de fluido, en cambio, son aquellas en las que un fluido recibe o entrega energía. Dentro de las máquinas de fluido se diferencian las turbomáquinas hidráulicas y las máquinas de fluido de

desplazamiento positivo (o bombas de desplazamiento positivo).

Para que una máquina de fluido pueda ser considerada como turbomáquina hidráulica (TMH), el fluido que la atraviesa debe poder asumirse como incompresible. Por esta razón, dentro de las TMH se encuentran los ventiladores, aunque el fluido que interviene es aire, ya que su funcionamiento se explica satisfactoriamente con la hipótesis de fluido incompresible (Mataix, 1982). El otro gran grupo de máquinas de fluido, en este caso bombas, es el de desplazamiento positivo, dentro del cual se encuentran las bombas alternativas y las rotativas, que no serán desarrolladas en este texto.

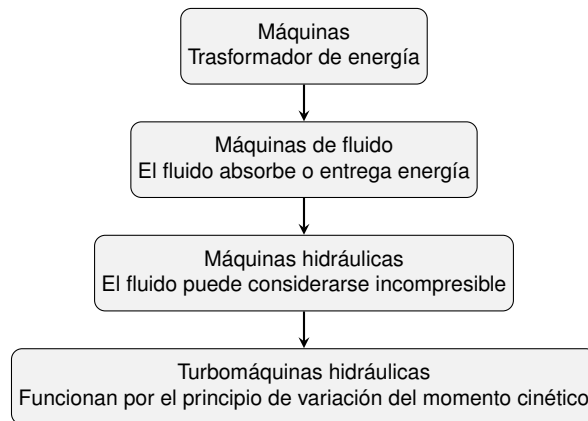


Figura 1.2: Definición de turbomáquina hidráulica

Las TMH funcionan bajo el principio de variación del momento cinético (Fig. 1.2), como se demostrará en el Capítulo 5. En estas máquinas las velocidades del flujo y su cambio de dirección juegan un rol preponderante. Las velocidades medias y altas dentro de las bombas y las turbinas hidráulicas que corresponden a la categoría de TMH, las hacen proclives al desarrollo de la cavitación (presencia de vapor por descenso de la presión a temperatura constante) y sufrir sus efectos negativos y limitaciones que este fenómeno impone al diseño e instalación de estas máquinas.

Componentes de una bomba rotodinámica y sus funciones

Una bomba consta de dos partes principales: un impulsor o rotor, que fuerza al líquido a girar mediante una acción de impulsión, y la carcasa de la bomba, que contiene y dirige el líquido al impulsor y lo aleja luego de pasar por él, a través del difusor, bajo una presión más alta (Fig. 1.3). El impulsor está montado en un eje que está soportado por cojinetes y accionado a través de un acoplamiento rígido o flexible por medio de un motor (Fig. 1.4). La carcasa de la bomba incluye un sector de succión o baja presión y uno de impulsión o de alta presión; además soporta los cojinetes y aloja el el rotor. La carcasa debe empaquetarse alrededor del eje para evitar fugas externas (ver 'sello' en la Fig. 1.3). El motor, generalmente eléctrico (Fig. 1.4), entrega la potencia mecánica al eje, que hace girar el rotor.

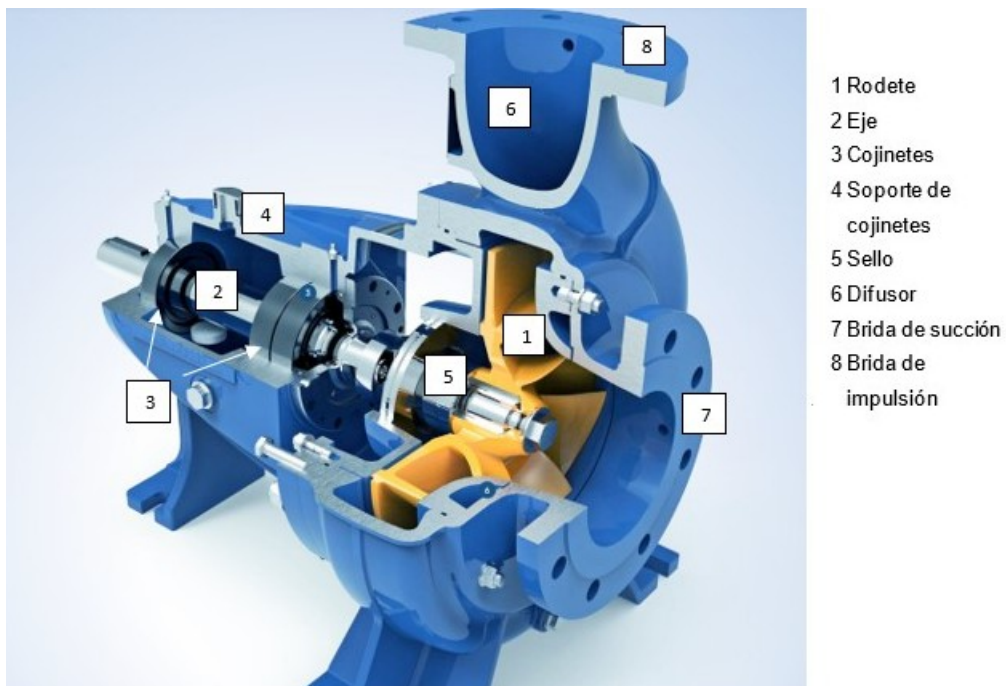


Figura 1.3: Componentes de una bomba centrífuga (fuente: <https://bit.ly/3u511ZJ>)



Figura 1.4: Grupo motobomba (bomba y motor) (fuente: <https://bit.ly/3bJKT9M>)

El líquido ingresa al impulsor o rodete y los álabes le confieren cantidad de movimiento angular a medida que avanza hacia el interior de este. Los álabes del rotor o impulsor y las paredes laterales del mismo, o cubiertas, forman los canales por donde se dirige el caudal desde el lado de succión hacia el lado de impulsión. Como resultado de la acción del impulsor, el líquido sale de él a una mayor presión y velocidad que la existente en su entrada ingresando a la cámara espiral, voluta o difusor (Figs. 1.3 a 1.5), donde la velocidad se convierte parcialmente en presión antes de salir a través de la brida de descarga.

Las bombas centrífugas, en general, están equipadas con un difusor, el cual puede tener paletas para redireccionar el flujo o no. En el difusor se transforma parte de la energía cinética en la salida del impulsor en presión estática. La geometría consiste en un canal en forma de espiral de área de sección transversal creciente cuyo propósito es recoger el flujo del difusor

(o impulsor) y entregarlo a la tubería de salida y a la vez lograr que, al disminuir la velocidad, aumente la presión interna antes de empalmarse con la tubería de impulsión. La energía cinética disponible en la entrada al difusor de una bomba es del orden del 50 % o más de la energía total entregada por el impulsor, lo cual explica la importancia del difusor en reconvertir parte de esta energía cinética en presión (Dixon, D. L., 2014) a partir de un diseño adecuado, que evite las pérdidas por despegamiento propias en los escurrimientos en geometrías divergentes.

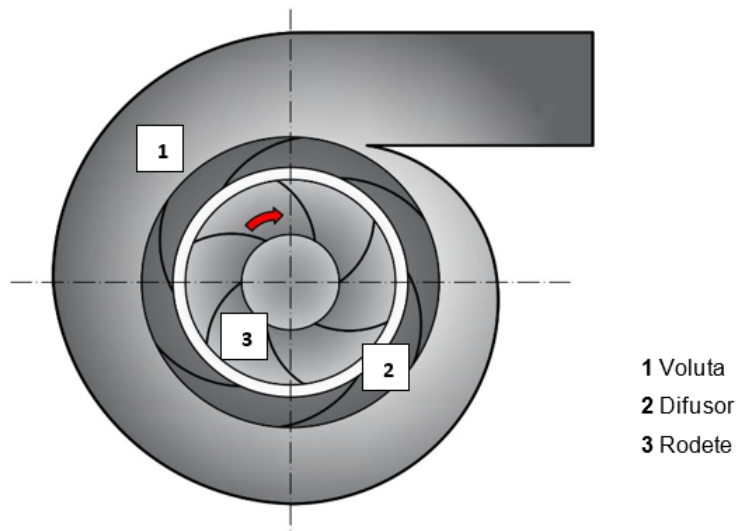


Figura 1.5: Componentes de una bomba centrífuga

Clasificación de las bombas según la dirección del flujo

Las TMH (bombas, turbinas y ventiladores) poseen un rotor, compuesto por una sucesión de álabes (Figs. 1.6 y 1.7, en amarillo), cuya rotación es lo que permite la transferencia de momento cinético al fluido. El rotor es el órgano central de la TMH y su diseño es diferente de acuerdo con la relación salto del impulsión – caudal para la cual se aplica, buscando que la transformación de energía sea lo más eficiente posible. En el caso de las bombas rotodinámicas el flujo recibe la energía que le entrega el rotor al girar gracias a disponer de un torque mecánico en el eje. El torque mecánico es provisto por un motor eléctrico que gira a una cierta velocidad, que será constante o podrá variarse, en caso de tener variador de la velocidad angular, con variación de la frecuencia o de la corriente.

Teniendo como referencia la dirección del eje de rotación y cómo son las trayectorias del flujo respecto a él, los rodetes o impulsores se clasifican en: axiales, diagonales, mixtos y radiales (Figs. 1.6 y 1.7). Considerando una trayectoria de flujo que atraviesa el rotor como curva de revolución –es decir, que define una superficie que contiene a todas las trayectorias idénticas– se pueden diferenciar las formas que adoptan estas superficies de escurrimiento según sean rodetes de diseño radial, mixto o axial, como se muestra en la Fig. 1.8. En los rodetes radiales, se asume que las trayectorias se desarrollan en planos perpendiculares al eje, de manera que no hay componentes en la dirección axial (Fig. 1.8a). En el otro extremo, para los rodetes axiales, las trayectorias evolucionan en superficies cilíndricas, concéntricas con el eje de rotación, de manera

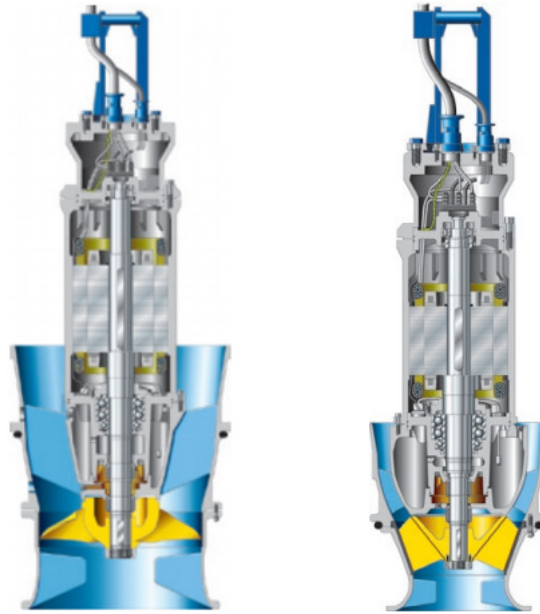


Figura 1.6: Clasificación de los rodetes (en amarillo) según la dirección del flujo: a) axial; b) diagonal (fuente: <https://bit.ly/3fAawL8>)

que no hay componentes radiales en el escurrimiento a través del rodetes (Fig. 1.8b).

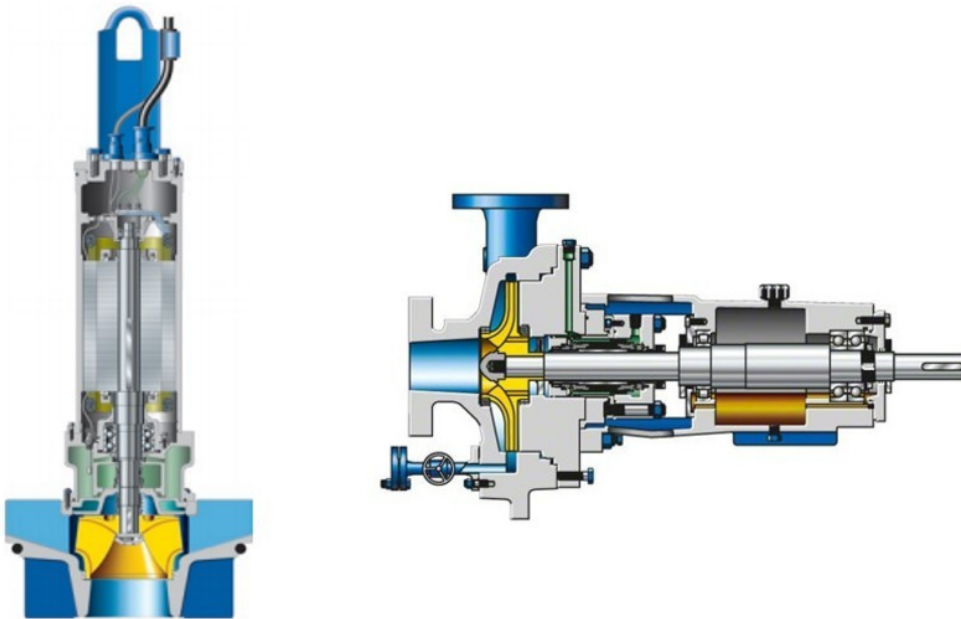


Figura 1.7: Clasificación de los rodetes (en amarillo) según la dirección del flujo: a) mixto b) radial (fuente: <https://bit.ly/3oxu3A9>)

En los rodetes denominados diagonales, las trayectorias se desarrollan en superficies cónicas (Fig. 1.8c) y en los llamados de flujo mixto o tipo Francis, las superficies que contienen las trayectorias son hiperboloides de revolución (estas superficies no son desarrollables), como lo muestra la Fig. 1.8d. En el caso de los diseños diagonales y de flujo mixto o Francis, cada punto de la trayectoria presenta componentes tangenciales, radiales y axiales. La descripción realizada supone que el escurrimiento es unidimensional, lo cual, a los fines descriptivos de la clasificación de los diseños, se considera una hipótesis adecuada (en la realidad se presentan componen-

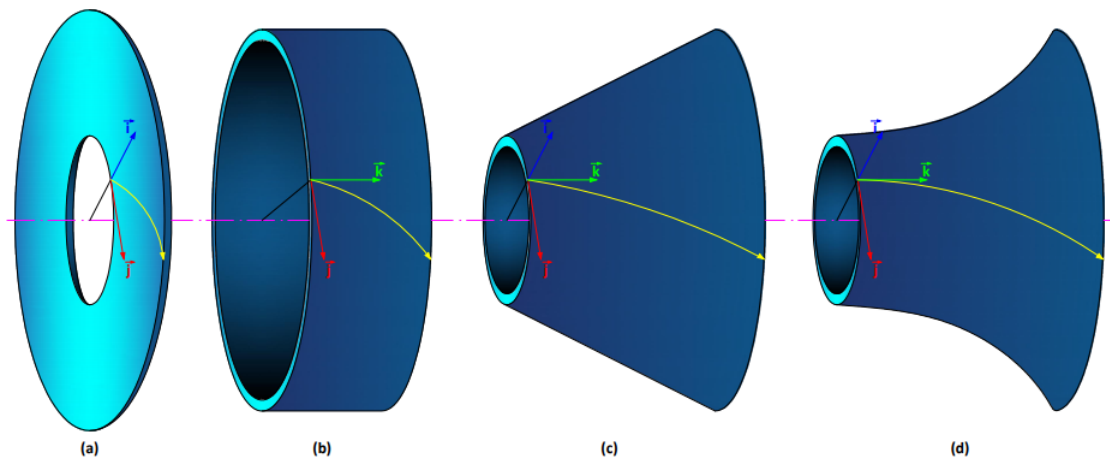


Figura 1.8: Superficie de escurrimiento meridiana que contiene la trayectoria: a) radial; b) axial; c) diagonal; d) mixta

tes tridimensionales de diferente magnitud de acuerdo al diseño y al punto de operación de la bomba).

Es habitual asociar la geometría con un parámetro característico de las turbomáquinas hidráulicas, que es el número específico de caudal como parámetro de clasificación (también llamado velocidad específica):

$$n_q = n \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H_u^{\frac{3}{4}}} \quad (1.1)$$

En esta ecuación, el número de vueltas n se expresa en rpm, el caudal, en m^3/s y el salto H_u , en m.

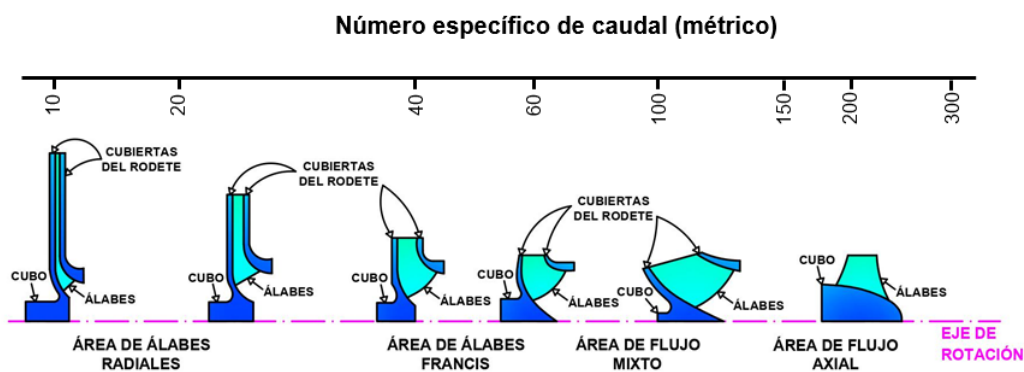


Figura 1.9: Velocidad específica para distintos diseños de rotores

Otras clasificaciones de bombas centrífugas

Las bombas también se pueden diferenciar según sean: de impulsor cerrado o abierto (Fig. 1.10), de un solo paso o de múltiples rodets (Fig. 1.11a) y c) respectivamente) o de simple o doble succión (Fig. 1.11a) y b) respectivamente). La diferenciación entre impulsores cerrados o abiertos corresponde a los rodets diagonales y mixtos, ya que los axiales son siempre abiertos. Se llama abierto al rodete que tiene los álabes en voladizo, diferenciándolo del cerrado, que es cuando los álabes están fijados en ambos extremos (tapa superior y tapa inferior o corona). Los rodets abiertos son recomendables cuando se bombean líquidos con materiales en suspensión,

reduciendo la posibilidad de obstrucciones. En el caso de las bombas que tienen un solo rodete, o las que tienen un arreglo de rodetes en serie, acoplados al mismo eje, la función de este arreglo es incrementar el salto de impulsión, cuando un solo rodete no es suficiente para un determinado caudal.

La clasificación de simple o doble succión, se refiere a que hay diseños en los cuales el caudal ingresa por dos secciones opuestas diametralmente (mitad por cada sección) y luego de atravesar el impulsor, que también está separado en dos partes, el caudal se unifica en la cámara difusora. Este diseño tiene ventajas respecto al de simple succión tanto desde el punto de vista mecánico, como también desde el punto de vista hidráulico (menor riesgo de cavitación y mayor rango de funcionamiento estable), aunque su diseño es más complejo y resultan más caros que los de simple succión.

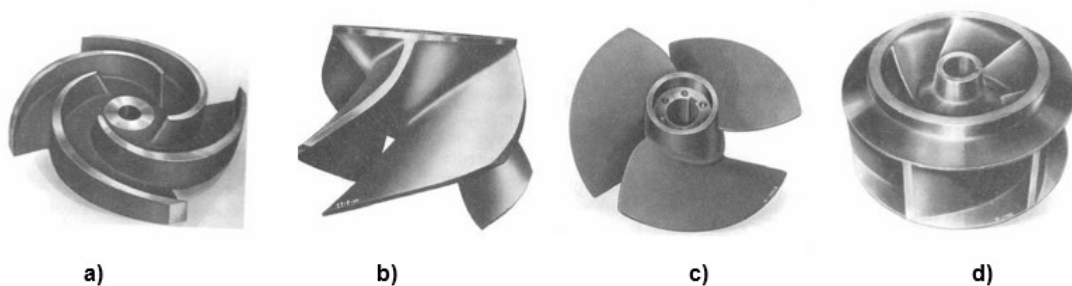


Figura 1.10: Rodetes abiertos (a, b y c) y cerrado (d)

Otras clasificaciones tienen en cuenta si las bombas están diseñadas para ser sumergidas en una cámara o cisterna, a las que se llama 'de cámara húmeda' (las de la Fig. 1.11 son de este tipo, se instalan como se ve en la Fig. 1.12) diferenciadas de las que se instalan 'en seco' que tienen un tramo de conducción que se conecta a la cisterna o cámara, mostradas en la Fig. 1.13), es decir, el cuerpo de la bomba no está sumergido en el agua.

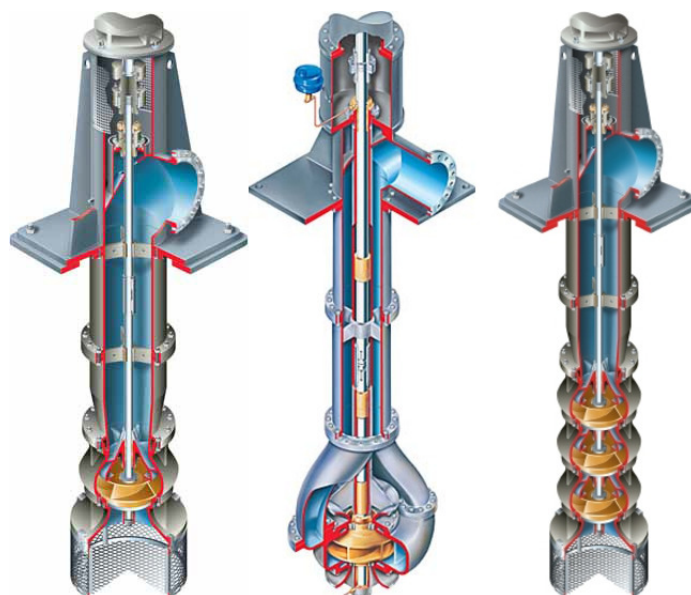


Figura 1.11: Bombas de: a) succión simple—una etapa; b) doble succión—una etapa; c) succión simple—multietapa (fuente: <https://bit.ly/3v6zNmQ>)

También las bombas se pueden clasificar según su disposición, como de eje vertical u horizontal. El motor puede instalarse sumergido (Fig. 1.12a) lo cual permite una reducción de la obra respecto de los instalados en seco (Fig. 1.12b), aunque con una tecnología más compleja y consecuentemente menos económica.

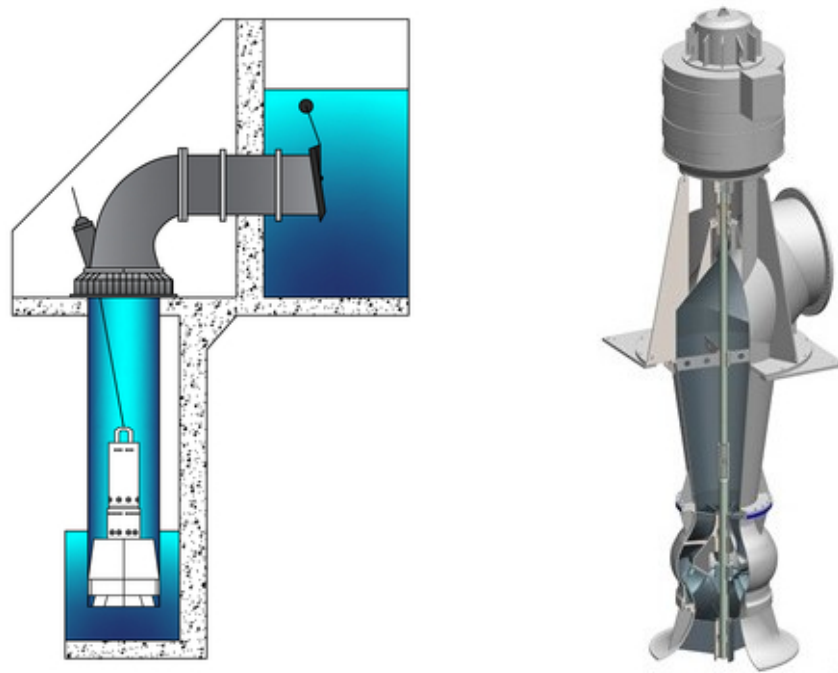


Figura 1.12: Bomba sumergible de eje vertical: a) motor sumergido; b) motor en seco (fuente imagen b: <https://bit.ly/3fxL1tX>)



Figura 1.13: Bombas de cámara seca y eje horizontal (fuente: <https://bit.ly/3yC3jDc>)

Un tipo especial de las bombas verticales multietapas son las diseñadas para pozos profundos (Fig. 1.14), en las cuales el motor tiene un diseño específico para este tipo de bombas, con un diámetro similar al de los impulsores. Al instalarse, quedan dispuestas como se ve en la misma figura. Estas bombas permiten extraer agua de napas de distinta profundidad, de allí la necesidad de la cantidad de etapas.

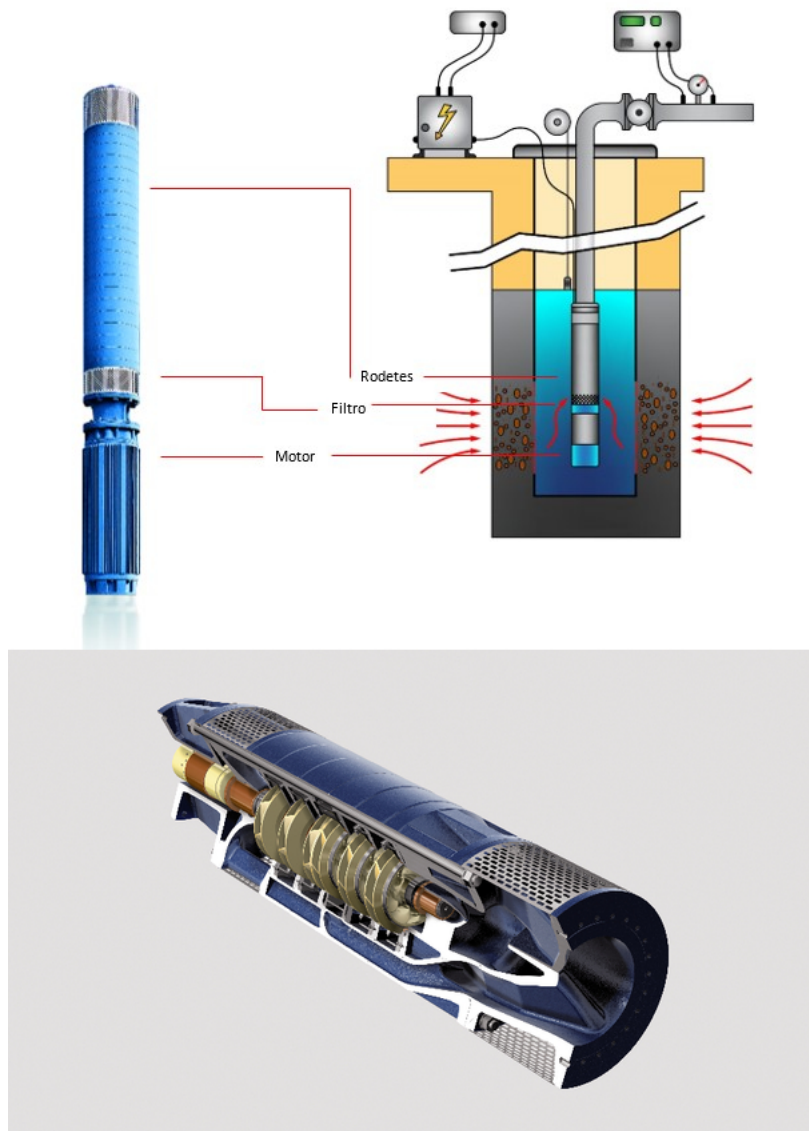


Figura 1.14: Bombas de pozo profundo (fuente: <https://bit.ly/3hTTc6T>)

Parámetros básicos de operación de una bomba

En esta sección, se mencionan algunas de las variables de operación que con más frecuencia se encuentran en el análisis de estaciones de bombeo y acueductos, las unidades con las que suelen expresarse y sus interrelaciones (cuadro 1.1).

Se ahondará luego en aquellas de carácter ineludible; a saber, el salto útil, el caudal y la potencia hidráulica.

Salto útil

Es la magnitud que se obtiene como diferencia entre las energías totales por unidad de peso H_2 y H_1 , calculadas en las respectivas secciones de salida (2) y entrada (1) a la bomba (Fig. 1.15) expresadas en unidades de longitud.

$$H_u = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + z_2 - z_1 \quad (1.2)$$

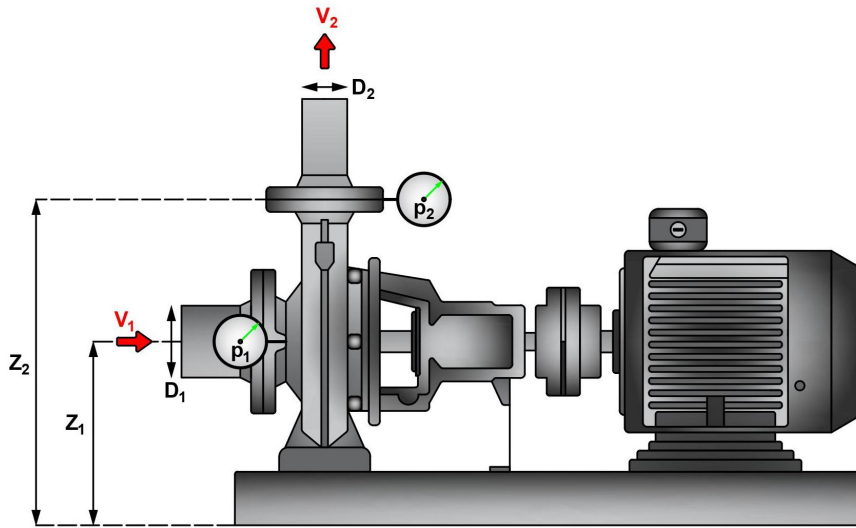


Figura 1.15: Medición del salto útil

Cuadro 1.1: Variables significativas y sus unidades

Nombre	Símbolo	Unidad	Dependencia
Salto útil	H_u	m	
Caudal	Q	m ³ /s	
Torque	T	kNm	
Velocidad de rotación	n	rpm	
	ω	Hz	$= \pi n/30$
Potencia hidráulica	P_h	kW	$= gH_u Q$
Potencia mecánica	P_m	kW	$= T\omega$
Potencia eléctrica	P_e	kW	
Rendimiento hidráulico	η_h	-	
Rendimiento mecánico	η_m	-	
Rendimiento eléctrico (del motor)	η_e	-	

El salto útil, representado con líneas de energía, se indica en la Fig. 1.16 para una bomba intercalada en una conducción y expresa la energía específica recibida por el fluido por la impulsión de la bomba. La ordenada marcada como H_u se indica como la diferencia entre las líneas de energía total (LET) entre la salida y la entrada a la bomba.

Cuando se trata de una bomba sumergible de eje vertical, como la que se indica en la Fig. 1.17, el rotor se ubica próximo a la toma abocinada y la provisión de la bomba incluye el tubo de impulsión acodado. En estos diseños, el salto útil se define como la diferencia de energía entre la sección final del codo y la superficie libre del recinto de succión, cámara o cisterna (Stepanoff, 1957), a menos que en las especificaciones particulares de la bomba, o en la norma utilizada, se indique de otra forma. Nótese que las pérdidas en la campana de succión y las correspondientes a la tubería de impulsión se consideran parte del diseño de la bomba, por lo cual, el proveedor de la bomba deberá tenerlas en cuenta cuidadosamente para maximizar el salto de impulsión de

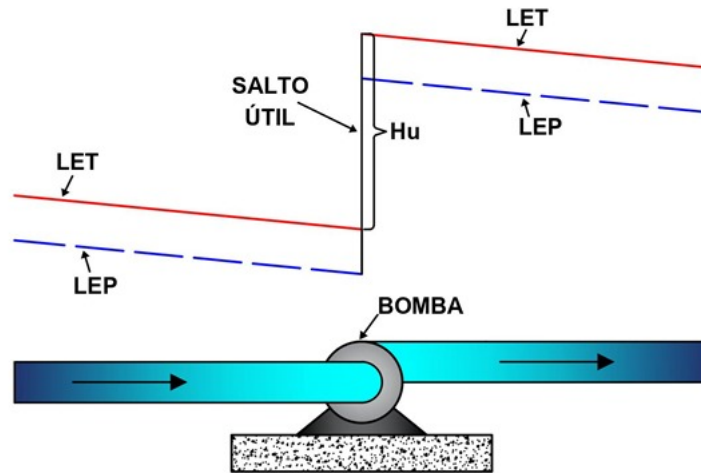


Figura 1.16: Medición del salto útil en bomba en línea

la bomba, que es un resultado del diseño del conjunto.

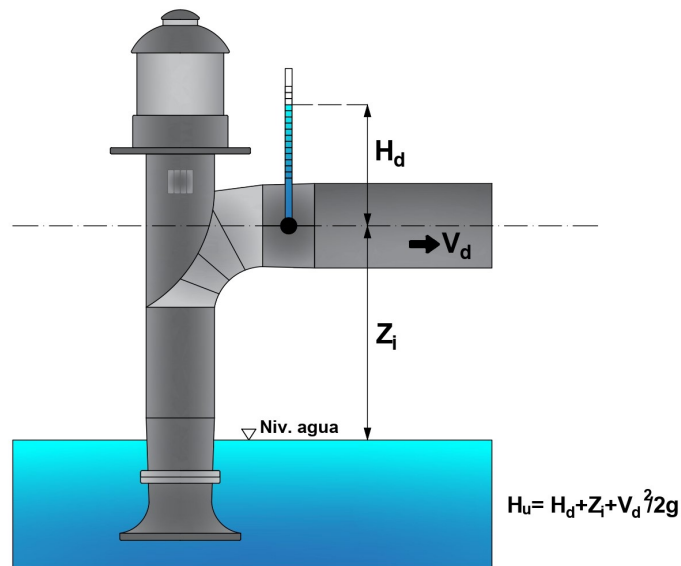


Figura 1.17: Medición del salto útil en bomba sumergible

Potencia hidráulica

Partiendo de la ecuación de Bernoulli de conservación de la energía, se puede expresar la altura de energía específica de la Ec. 1.2 como el cociente entre la energía (E) y el peso (γV , donde V es el volumen)

$$H_u = \frac{E}{\gamma V} \quad (1.3)$$

Procesando la ecuación a partir de la derivada respecto al tiempo de la energía y del volumen, se encuentra la potencia hidráulica entregada por la bomba, expresada en función del peso específico, el caudal y el salto útil.

$$E = \gamma H_u V \quad (1.4)$$

Luego:

$$P_h = \frac{dE}{dt} = \gamma H_u \frac{dV}{dt} = \gamma H_u Q \quad (1.5)$$

En vista de que $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ para el agua a $3,8^\circ$, cuando se expresa en unidades del Sistema Internacional, la potencia resulta:

$$P_h = 1000gH_uQ \quad (1.6)$$

Y, dado que los órdenes de magnitud de la potencia asociada a instalaciones hidromecánicas es de miles de vatios, resulta, por lo usual, preferible emplear el kilovatio como su unidad de medida, en cuyo caso, el valor numérico puede calcularse simplemente por la Ec. 1.7:

$$P_h = gH_uQ \quad (1.7)$$

El rendimiento (variable entre 0 y 1) provee una medida cualitativa de la eficiencia con que se produce la transformación de una cierta clase de potencia en otra. Así, por ejemplo, el rendimiento hidráulico, η_h , da cuenta de las pérdidas volumétricas y de carga por fugas y recirculación en la transferencia de la potencia mecánica y el rendimiento mecánico, η_m , de la disipación de energía en acoplamiento del eje/cojinetes. Más adelante se describirá con mayor detalle el origen y la composición de las pérdidas que dan lugar a los rendimientos.

La potencia hidráulica es el resultado de la transformación desde la potencia eléctrica que toma el motor hasta la obtenida finalmente en forma de potencia hidráulica. O sea:

$$P_h = \eta_e \eta_h \eta_m P_e \quad (1.8)$$

Donde $\eta_T = P_h/P_e$ representa el rendimiento del conjunto o grupo motobomba.

Las bombas de menor tamaño (uso doméstico), tienen rendimientos del grupo motobomba muy bajos, del orden del 50 % o aún menos. Cuanto mayor es el tamaño de la bomba mayores son los rendimientos, que llegan a valores del orden del 85 % cuando los caudales son de varios metros cúbicos por segundo.

Las bombas de uso comercial en general están accionadas por motores asincrónicos, cuya velocidad de rotación depende de la cantidad de pares de polos del motor. Los dos elementos más importantes de los motores asincrónicos son el estator y el rotor. El estator se encuentra fijado en la carcasa del motor y no tiene movimiento. En el mismo se coloca un bobinado o devanado trifásico desfasado 120° en el espacio. El rotor es un cilindro que se coloca dentro del estator y que tiene la posibilidad de rotar. El devanado del estator es alimentado por un sistema trifásico, lo cual induce un campo magnético giratorio dentro del motor. El campo magnético creado induce la aparición de una fuerza electromotriz (ley de Faraday) que crea una corriente en las barras del rotor. Luego, de la interacción entre esta corriente creada en el rotor y el campo magnético rotante, surge la fuerza que aparece en el rotor y que lo hace girar. La denominación de asincrónicos se debe a que siempre hay un retraso en la velocidad de giro del rotor respecto a la velocidad sincrónica, es decir aquella que está en sincronismo con la frecuencia de la red eléctrica, que en nuestro país es 50 Hz.

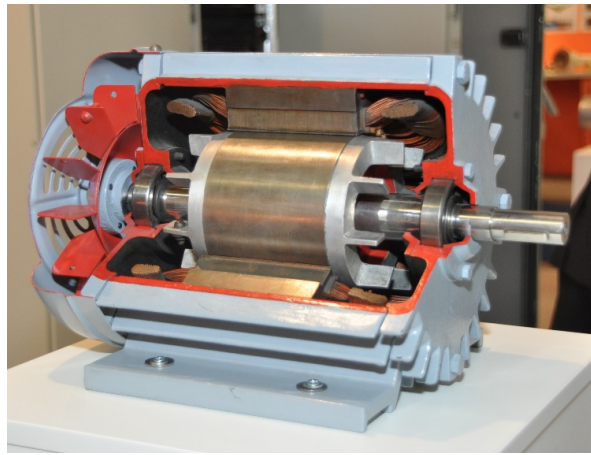


Figura 1.18: Motor asincrónico (fuente: <https://bit.ly/2Sfn7v6>)

En el Cuadro 1.2 se indican los valores de la velocidad de giro en rpm para distinta cantidad de polos y dos valores de frecuencia: 50 Hz, que es la frecuencia de la corriente alterna utilizada en el sistema de distribución de nuestro país; y 60 Hz, que se utiliza en otros países.

Cuadro 1.2: Velocidad angular en función de la frecuencia de corriente y el número de polos

Frecuencia \ Nro. de polos	Nro. de polos							
	2	4	6	8	10	12	14	
50 Hz	2900	1450	960	725	580	480	415	
60 Hz	3500	1750	1160	875	700	580	500	

Referencias

Dixon, S.L. (2014). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Seventh Edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann Jones, Garr M., (2008). *Pumping Station Design*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Engeda, A. (1998). *Early Historical Development of the Centrifugal Impeller*. New York: ASME
 Karassik, I.J., Messina, J.P., Cooper, P., Heald, C.C. (2001). *Pump Handbook, 3rd ed.*. New York: McGraw-Hill.

Mataix, C. (1982). *Turbomáquinas hidráulicas*. Madrid: Harla.

Stepanoff, A.J. (1957). *Centrifugal and axial flow pumps: theory, design and application*. New York: John Wiley and Sons.

Van Esch, B.P.M. (1997). *Simulation of three-dimensional unsteady flow in hydraulic pumps - Thesis University of Twente*. Enschede: Febodruk B.V.

Se han citado, a lo largo del capítulo, enlaces a distintas *webpages*. Se listan a continuación, junto con los sitios principales de las cuales fueron obtenidas y la fecha de acceso:

- Fig. 1.3: <https://bit.ly/3u511ZJ> en <https://www.andritz.com>. Obtenido el 20/05/2021
- Fig. 1.4: <https://bit.ly/3bJKT9M> en <https://www.pedrollo.com>. Obtenido el 20/05/2021
- Fig. 1.6: <https://bit.ly/3fAawL8> en <https://www.ksb.com>. Obtenido el 20/05/2021

- Fig. 1.7: <https://bit.ly/3oxu3A9> en <https://www.ksb.com>. Obtenido el 20/05/2021
- Fig. 1.11: <https://bit.ly/3v6zNmQ> en <https://www.flowserve.com>. Obtenido el 20/05/2021
- Fig. 1.12: <https://bit.ly/3fxL1tX> en <https://www.sulzer.com>. Obtenido el 20/05/2021
- Fig. 1.13: <https://bit.ly/3yC3jDc> en <https://www.sulzer.com>. Obtenido el 20/05/2021
- Fig. 1.14: <https://bit.ly/3hTTc6T> en <https://www.andritz.com>. Obtenido el 20/05/2021
- Fig. 1.16: <https://bit.ly/2Sfn7v6> en Wikimedia Commons Autor: S.J. de Waard. Obtenido el 20/05/2021