

Tema 10. Bombas Rotodinámicas en Instalaciones.

10.1. Introducción

En el Tema 9 se han definido los factores dependientes de las características de las bombas rotodinámicas en sí mismas, como elemento aislado. En este tema se van a considerar todos los aspectos relacionados con la colocación de las bombas en una instalación, para bombear un fluido, pues nos interesa determinar cómo se va a comportar una bomba en una instalación determinada.

10.2. Cebado de una Bomba Rotodinámica

La semejanza de alturas en bombas rotodinámicas establece que, entre un prototipo y un modelo, operando en condiciones semejantes:

$$\frac{H_p}{H_m} = \lambda^2 \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^2 \quad (4.21)$$

Si el prototipo y el modelo, en realidad, son la misma bomba operando con distintos fluidos, la ecuación (4.21) se puede escribir como:

$$\frac{H_1}{H_2} = \text{constante} \quad (10.1)$$

donde los subíndices 1 y 2 representan la operación con los distintos fluidos. Dado que es la misma bomba, y acoplada al mismo motor, tanto el factor de escala como la relación de velocidades de giro son la unidad. De acuerdo con la ecuación (10.1), la altura de fluido que proporciona una bomba rotodinámica es un valor constante, independientemente del fluido con el que opere.

Supongamos que tenemos una bomba rotodinámica llena de agua. Cuando está en funcionamiento, proporciona una energía al fluido de H m de agua, lo que indica que proporciona energía para subir el agua hasta H m de altura.

Supongamos que tenemos ahora la misma bomba rotodinámica vacía, es decir, llena de aire. Al ponerla en funcionamiento, proporciona al aire que la llena una energía de H m de aire. El aire tiene una densidad aproximada de $1,2 \text{ kg/m}^3$ (a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión atmosférica), y el agua de 1.000 kg/m^3 . Por poner números, supongamos que H sean 60 m, que corresponde a una energía de:

$$\rho \cdot g \cdot H = 1,2 \cdot 9,8 \cdot 60 \text{ Julios} = 706 \text{ J}$$

que, transformados en altura de agua, quedarían:

$$H_{\text{agua}} = \frac{706}{9,8 \cdot 1.000} \text{ mca} = 0,072 \text{ mca} \quad [\text{mca} = \text{metros de columna de agua}]$$

es decir, 7,2 cm de agua. Y eso a pesar de que sería capaz de comunicar 60 mca cuando se encuentra llena de agua.

Así, si el nivel de agua está a más de 7,2 cm por debajo del nivel del rodete, la bomba será incapaz de aspirar el agua y llenarse. El cebado de una bomba rotodinámica establece, pues, que es necesario llenarla del fluido que se quiere bombear para que funcione, antes de ponerla en marcha, y es algo que debe conocer cualquiera que tenga que operar con bombas rotodinámicas.

10.3. Curva Característica de la Instalación

La curva característica de la instalación es aquella que relaciona la altura que debe comunicar una bomba al fluido para que circule con un determinado caudal por esa instalación. En definitiva, relaciona también valores de H en función de Q . Para establecer esta relación, se aplica la ecuación de Bernouilli entre el punto inicial y final de esa instalación, a los que vamos a llamar puntos a y b (para evitar confusiones con entrada y salida de rodete, 1 y 2, o con entrada y salida de bomba, E y S), de acuerdo con la ecuación (2.8):

$$\frac{p_a}{\rho \cdot g} + z_a + \frac{v_a^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_a} + H = \frac{p_b}{\rho \cdot g} + z_b + \frac{v_b^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_b} + f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (10.2)$$

donde H representa la energía que requiere la instalación para que circule el fluido con velocidad v , y L es la longitud equivalente de la instalación.

Como nos interesa expresar la ecuación (10.2) en función del caudal, sustituimos v en función del caudal y la sección de paso de la instalación, de donde se obtiene:

$$\frac{p_a}{\rho \cdot g} + z_a + \frac{v_a^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_a} + H = \frac{p_b}{\rho \cdot g} + z_b + \frac{v_b^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_b} + f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g} \quad (10.3)$$

y, llamando al conjunto de factores que multiplican al caudal K , se puede escribir, despejando H y reagrupando términos:

$$H = \left[\left(\frac{p_b - p_a}{\rho \cdot g} \right) + (z_b - z_a) + \left(\frac{v_b^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_b} - \frac{v_a^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_a} \right) \right] + K \cdot Q^2 \quad (10.4)$$

El término entre corchetes sólo depende del punto inicial y final de la instalación, y en la práctica suele estar asociado únicamente con el término de diferencia de alturas o, a lo sumo, también con el de diferencia de presiones, si alguno de los puntos (inicial o final) se encuentra cerrado. El término entre corchetes se suele llamar H_g y, dado que es independiente del caudal que circula por la instalación, permite describir la dependencia

de H requerida por la instalación frente al caudal como una parábola con un mínimo (K es siempre positivo), de modo que:

$$H = H_g + K \cdot Q^2 \quad (10.5)$$

donde K depende de la longitud equivalente de la instalación, y aumenta cuando se cierra parcialmente una válvula, por ejemplo.

10.4. Punto de Funcionamiento

Cuando se coloca una bomba de curva característica motriz dada por la expresión general de la ecuación (9.15) en una instalación cuya curva característica viene dada por la ecuación (10.5), inmediatamente se establece un punto de funcionamiento dado por el punto de corte de ambas curvas. A este punto se llega de forma espontánea, ya que implica cumplir simultáneamente con las características de la bomba y con los requisitos de la instalación, y viene representado en la Figura 10.1. Se indica también en la figura a qué corresponde el valor de H_g .

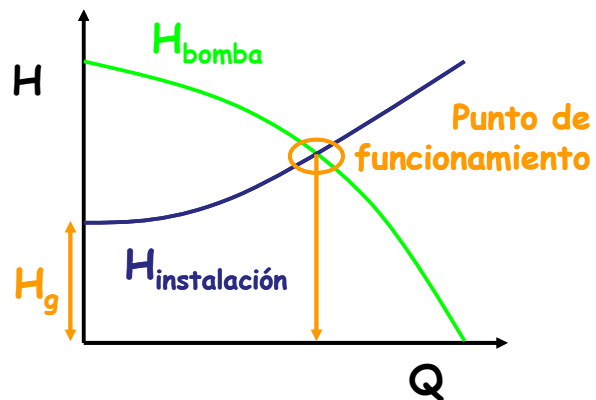


Figura 10.1. Punto de funcionamiento de una bomba en una instalación.

Como puede verse en la Figura 10.1, el punto de corte de ambas curvas determina el caudal que dará esa bomba cuando se coloque en esa instalación, y el valor de H que le comunicará al fluido. Eso no implica que esa bomba no pueda proporcionar un caudal distinto, pero sí implica que no podrá proporcionar, en ningún caso, un caudal superior al obtenido en el punto de funcionamiento.

En la práctica, estamos acostumbrados a regular el caudal mediante el uso de válvulas. El cierre de una válvula modifica la longitud equivalente de la instalación, aumentando el valor de K en la ecuación (10.5). Esto produce una modificación en la curva de la instalación y, por tanto, del punto de funcionamiento, como se puede observar en la Figura 10.2.

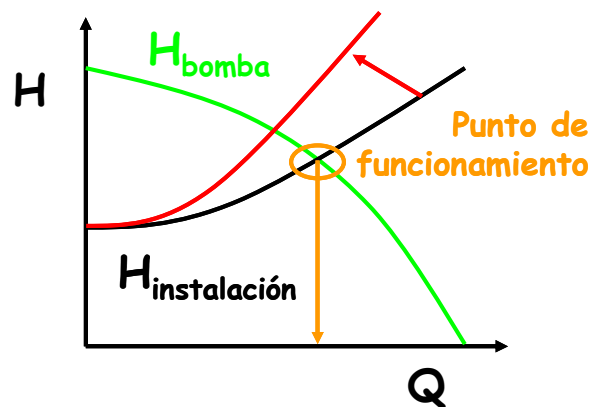


Figura 10.2. Modificación del punto de funcionamiento por el cierre de una válvula en la instalación.

10.5. Golpe de Ariete en Bombas Rotodinámicas

La variación de caudal originada por la puesta en funcionamiento o por la parada de una bomba en una instalación puede ocasionar golpes de ariete, que pueden causar daños importantes en una instalación debido a las variaciones de presión que pueden involucrar.

a) Golpe de ariete relacionado con el arranque

Aunque se produce golpe de ariete cuando arranca la bomba, no se produce una situación de riesgo para la instalación, ya que la máxima sobrepresión que puede ocasionarse viene dado por el máximo valor de H de acuerdo con su curva característica, que corresponde, de acuerdo con la ecuación (9.15), con el corte de la curva con el eje de ordenadas (a caudal cero; ver la curva verde en la Figura 10.1).

b) Golpe de ariete relacionado con la parada

Si la parada de la bomba es prevista, prevenir el efecto del golpe de ariete es sencillo, ya que sólo requiere ir cerrando lentamente la válvula de la instalación, para reducir el caudal, antes de pararla.

El problema puede suceder cuando la parada se produce de forma imprevista: un corte de la corriente eléctrica, por ejemplo, si el motor es eléctrico, y es tanto más importante cuanto más grande es la bomba y la instalación en la que opera, y si funciona con grandes caudales de fluido. En estos casos, además de dispositivos preventivos en la propia instalación, se puede colocar un volante de inercia acoplado al eje de la bomba, por ejemplo. En el momento de la parada, el volante de inercia continuará haciendo girar el rodete durante cierto tiempo, lo que reducirá el efecto del golpe de ariete.

10.6. Cavitación en Bombas Rotodinámicas

La cavitación, en bombas rotodinámicas, está relacionada con el vacío que puede producirse en el tubo de aspiración, antes de la entrada del fluido en el rodete. Si la presión se reduce en algún punto por debajo de la presión de vapor del fluido bombeado a la temperatura a la que se encuentra, se producirá cavitación. El fluido, al evaporarse, forma burbujas. Al alcanzar el rodete, que comunica energía al fluido (eleva su presión), las burbujas vuelven a condensar, produciéndose una reducción de volumen muy importante (la relación de volumen molar de gas a volumen molar de líquido), de modo que se produce una importante vibración del rodete, que puede producir roturas en la bomba.

Para evitar que este efecto indeseado se produzca, o determinar en qué condiciones se producirá, se determina la carga neta de aspiración positiva ($NPSH$) requerida por la bomba para que no se produzca cavitación, y la disponible por parte de la instalación, en función del caudal. Como puede suponerse, se trata de dos curvas características: una de la bomba (requerida), y otra de la instalación (disponible). El problema de la cavitación sólo surge cuando se bombean líquidos (o vapores condensables).

10.6.1 Curva Característica de NPSH Requerida por la Bomba

La *NPSH* requerida por la bomba se refiere a la energía que debe tener el fluido en el punto E, de entrada a la bomba, como mínimo, para evitar que cavite antes de alcanzar el punto 1, de entrada al rodete. Para determinar esta curva característica, se aplica la Ecuación de Bernoulli entre el punto E y el punto 1, ambos situados a la misma altura:

$$\frac{p_E}{\rho \cdot g} + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} = \frac{p_V}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + H_{rE-1} \quad (10.6)$$

donde se considera flujo turbulento en los dos puntos, y la presión que define la situación límite para que no se produzca cavitación en el punto 1 es que su presión sea la presión de vapor del fluido a la temperatura a la que se encuentre, p_v .

Se llama *NPSH* a la diferencia entre la carga del fluido en el punto E y la de la presión de vapor, que es la máxima energía que puede ceder entre E y 1 sin cavitarse. La requerida por la bomba se relaciona con:

$$NPSH = \frac{p_E - p_V}{\rho \cdot g} + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + H_{rE-1} \quad [\text{altura}] \quad (10.7)$$

Tanto c_1 como H_{rE-1} dependen del caudal. La *NPSH* requerida por la bomba se puede medir experimentalmente, o la da el fabricante, dentro de sus curvas características, en función del caudal.

Si no se dispone de ningún dato experimental, se puede hacer una estimación del valor de *NPSH* requerido por la bomba a partir de una expresión similar a la de n_q :

$$\frac{n \cdot Q^{1/2}}{NPSH^{3/4}} \geq 157 \quad (10.8)$$

donde las unidades empleadas son también las mismas que en n_q (n en rpm, Q en m^3/s , y *NPSH* en m). De hecho, el *NPSH* requerido por la bomba se puede tratar de forma similar a H en las relaciones de semejanza de alturas, en bombas.

10.6.2 Curva Característica de NPSH Disponible en la Instalación

Desde el punto de vista de la instalación, se trata de que el fluido alcance el punto E de entrada a la bomba con suficiente energía para que no cavite después dentro de la bomba. En este caso, se aplica la ecuación de Bernoulli entre la superficie del depósito (punto 0) del que toma el fluido la bomba y el punto E, a lo largo del tubo de aspiración:

$$\frac{p_0}{\rho \cdot g} + z_0 = \frac{p_E}{\rho \cdot g} + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} + z_E + H_{r0-E} \quad (10.9)$$

A la diferencia de alturas entre el punto E y el punto O ($z_E - z_0$) se le conoce como altura de aspiración (H_a), y a la pérdida de carga en el tubo de aspiración H_{ra} . Sustituyendo estos parámetros en la ecuación (10.9) y llevando al primer miembro los términos relacionados con el punto E, queda:

$$\frac{p_E}{\rho \cdot g} + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} = \frac{p_0}{\rho \cdot g} + H_a + H_{ra} \quad (10.10)$$

El primer miembro corresponde a la carga del fluido en el punto E, y se conoce también como *NPSH* disponible bruta en el punto E. Pero el fluido no puede perder toda la carga que lleva en el punto E, sino que lo máximo que puede disminuir la presión es hasta la presión de vapor del fluido a la temperatura a la que está. De este modo, se define la *NPSH* disponible neta a la carga en el punto E menos la carga de presión de vapor:

$$NPSH = \frac{p_E - p_V}{\rho \cdot g} + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} = \frac{p_0 - p_V}{\rho \cdot g} + H_a + H_{ra} \quad (10.11)$$

La Figura 10.3 muestra el comportamiento de las curvas *NPSH* requerida y disponible, en función del caudal. Como puede observarse, el comportamiento es el opuesto que el que se produce en las curvas de *H* frente a *Q* de la bomba y de la instalación, en la Figura 10.2. Con la *NPSH*, la curva correspondiente a la instalación es una parábola con un máximo, mientras que la requerida por la bomba es una parábola con un mínimo.

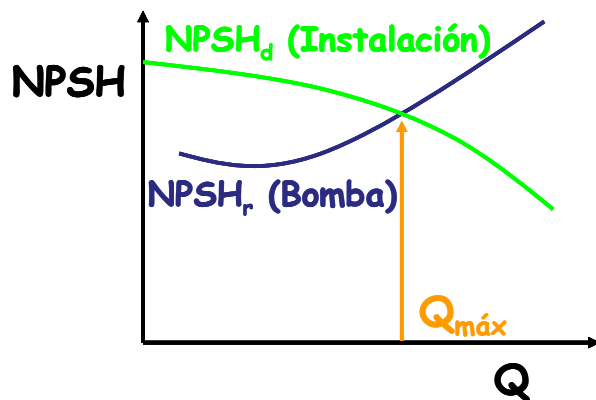


Figura 10.3. Curvas de *NPSH* requerida y disponible, en función del caudal, para bombas rotodinámicas

10.7. Altura Máxima de Aspiración de Bombas Rotodinámicas

El problema que se plantea es, normalmente, determinar a qué altura se puede situar, como máximo, la bomba con respecto al nivel de la superficie del depósito del que aspira. Esta altura viene determinada por el punto de corte entre la *NPSH* requerida y disponible, tal como se indica en la Figura 10.3, es decir, el punto en que ambos *NPSH* se igualan, que señala, a su vez, el caudal máximo para que no se produzca cavitación.

La altura máxima de aspiración de una bomba en ningún caso debe superar lo 6,5 m. Por otro lado, suele establecerse un margen de seguridad, y a la altura de aspiración determinada mediante la ecuación (10.11), igualándola a la requerida por la bomba, se le restan 0,5 m.

10.8. Acoplamiento de Bombas Rotodinámicas

Por requisitos de la instalación, en ocasiones se emplean varias bombas para la impulsión del fluido en la instalación en lugar de una sola. En estos casos, las bombas suelen ser iguales entre sí. Al conjunto de bombas acopladas se le conoce como grupo. En la práctica, en instalaciones industriales es habitual trabajar con grupos, en lugar de con una única bomba. Dos son las razones fundamentales: económica, dado que siempre hay que disponer de repuestos de bombas para evitar que la instalación deje de operar, que podrán ser más pequeñas y, por lo tanto, más baratas; y de seguridad, ya que quedarán el resto de bombas del grupo para seguir la operación, aunque alguna falle.

Las curvas características motriz y de rendimiento del grupo se pueden expresar en función de la de cada bomba individual. Las expresiones serán diferentes en función de si se acoplan en serie o en paralelo.

10.8.1. Bombas Rotodinámicas Acopladas en Paralelo

Cuando las bombas se acoplan en paralelo, el caudal que circula por la instalación, Q , se distribuye uniformemente entre cada una de las bombas, de modo que por cada una circulará un caudal de Q/n_b , donde n_b representa el número de bombas. Por otro lado, cada elemento de fluido circula por una sola de las bombas, por lo que la altura que se le comunica es la misma que si sólo hubiese una bomba.

De este modo, la curva característica motriz para el grupo de bombas en paralelo queda, a partir de la ecuación (9.15) para una sola bomba:

$$H = a + b \cdot \left(\frac{Q}{n_b} \right)^2 \quad (10.12)$$

y la de rendimiento del grupo, a partir de la ecuación (9.19) para una sola bomba, queda:

$$\eta = a \cdot \left(\frac{Q}{n} \right) + b \cdot \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \quad (10.13)$$

Esto se puede ver de forma gráfica, para las bombas acopladas en paralelo, en la Figura 10.4.

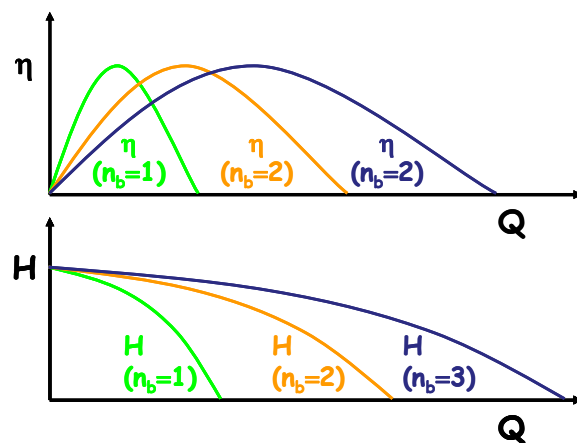


Figura 10.4. Curvas características de altura y rendimiento para una, dos y tres bombas acopladas en paralelo.

10.8.2. Bombas Rotodinámicas Acopladas en Serie

Cuando las bombas del grupo se acoplan en serie, cada elemento de fluido atraviesa todas las bombas, por lo que la altura que le comunican es la suma de la que le comunica cada una de las bombas por separado. Por otro lado, por cada bomba pasa el mismo caudal que el de la instalación.

De este modo, la curva motriz para el grupo queda, a partir de la ecuación (9.15) para una sola bomba, como:

$$H = n_b \cdot (a + b \cdot Q^2) \quad (10.14)$$

mientras que la curva de rendimiento del grupo queda, a partir de la ecuación (9.19) para una bomba:

$$\eta = (a \cdot Q + b \cdot Q^2)^{n_b} \quad (10.15)$$

aunque, dado que la ecuación (10.15) presenta el máximo rendimiento en el mismo punto que la ecuación (9.19) para una bomba, no es extraño que se utilice la ecuación (9.19) para expresar el rendimiento de bombas en serie. La Figura 10.5 muestra las curvas características de altura y rendimiento para bombas acopladas en serie.

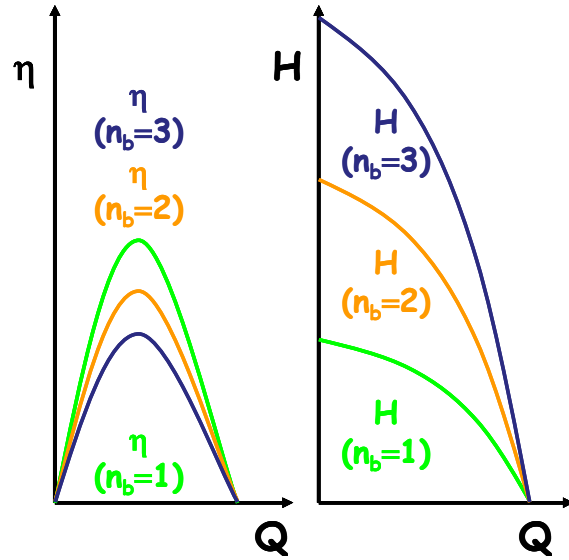


Figura 10.5. Curvas características de altura y rendimiento para una, dos y tres bombas en serie.