Determinación de las características de una bomba centrífuga

1. INTRODUCCION

1.1. Bombas Centrífugas

Una bomba es un aparato que sirve para transportar líquidos de un sitio a otro a través de una conducción. Para conseguir que el líquido se desplace con un cierto caudal, la bomba debe suministrar al fluido una determinada cantidad de energía mecánica.

Las bombas centrífugas son, sin duda, las bombas más extensamente utilizadas en la industria. Están formadas por un disco rotatorio denominado rodete, provisto de unas nervaduras o álabes. El disco rotatorio gira a gran velocidad dentro de una carcasa metálica (1500-3000 rpm). El líquido entra a la bomba por el eje hueco del rodete y es aspirado como consecuencia de la disminución inicial de presión que producen sus álabes al girar. A continuación este líquido es impulsado radialmente a lo largo de los álabes por la acción de la fuerza centrífuga, aumentando considerablemente su energía cinética. A la salida del rodete, esta energía cinética adquirida se transforma en energía de presión, de acuerdo con el balance de energía mecánica, al ir aumentando paulatinamente la sección de paso y disminuir, por lo tanto, la velocidad.

Este ensanchamiento progresivo se puede conseguir dándole a la carcasa una forma de espiral, denominada voluta (como se indica en la figura 1) o mediante una pieza fija dotada de álabes, denominada difusor (como se aprecia en la figura 2).

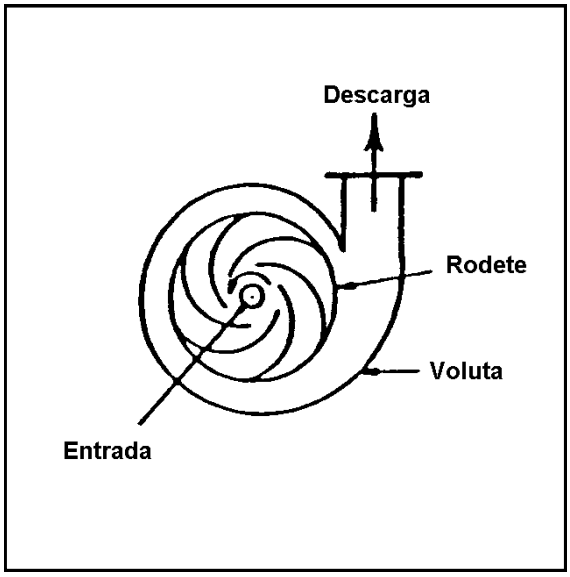

Figura 1. Bomba centrífuga de voluta.

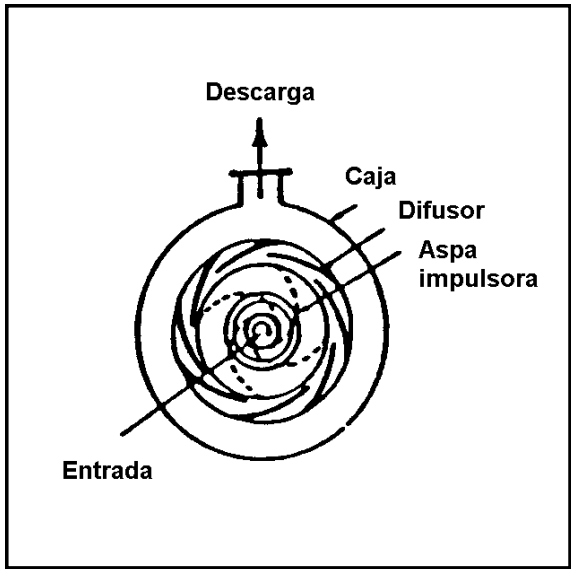

Figura 2. Bomba centrífuga de difusor.

1.2. El Sistema

Recibe el nombre de sistema el conjunto de conducciones con todos sus accesorios por los que circula un determinado líquido desde su inicio (punto 1) hasta su final (punto 2). Un sistema típico podría ser el que se esquematiza en la figura 3.

La expresión general del balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 2 de una conducción suele expresarse en la forma:

$$g(z_2 - z_1) + \left[\frac{V_2^2}{2\alpha_2} - \frac{V_1^2}{2\alpha_1}\right] + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \Sigma F = \hat{W}_s \qquad (1)$$

Sin embargo, cuando se discuten los problemas de bombeo de líquidos, los términos de la ecuación del balance de energía mecánica no suelen expresarse como "energía por unidad de masa" (J/kg), tal como aparecen en la ecuación (1), sino como cargas, que no son más que los mismos términos divididos por la aceleración de la gravedad, g. En ese caso, las unidades de cada término serán (J/kg)/(m/s^2) ≡ m, es decir, que el valor de la energía mecánica de cada término viene expresada como la altura a la que podría elevarse el líquido de que se trate.

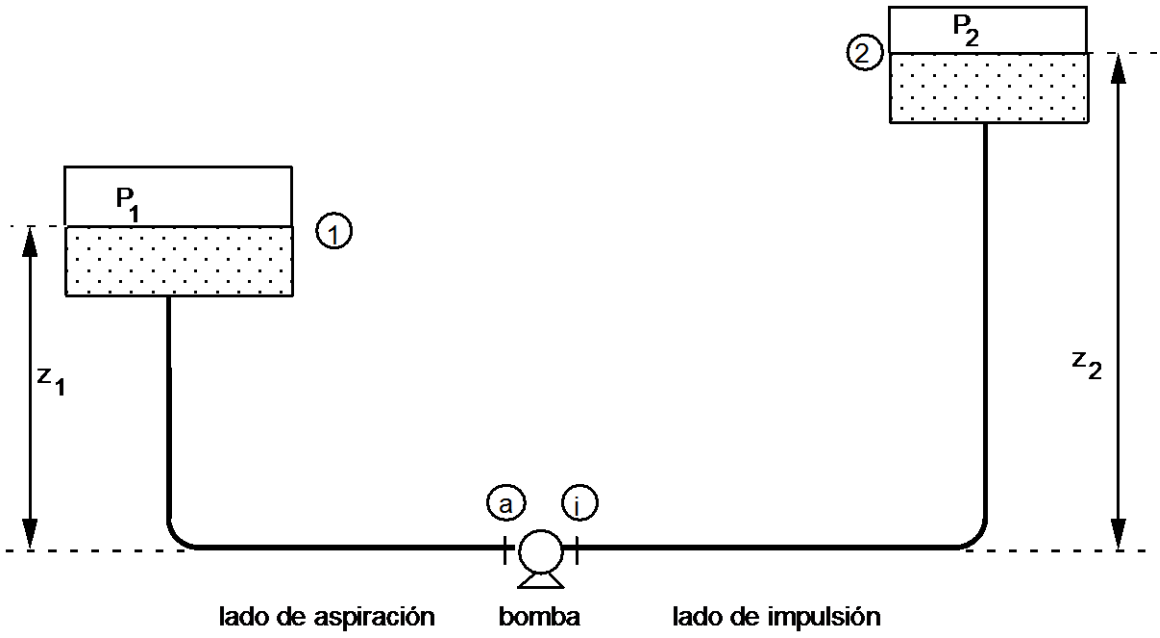

Figura 3. Sistema de conducciones para el bombeo de un líquido.

Así pues, el balance de energía mecánica quedará, expresando todos los términos como cargas, de la forma:

$$(z_2 - z_1) + \left[\frac{V_2^2}{2g\alpha_2} - \frac{V_1^2}{2g\alpha_1}\right] + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{\Sigma F}{g} = \frac{\hat{W}_s}{g} \qquad (2)$$

variación de la carga estática	variación de la carga de velocidad	variación de la carga de presión	pérdida de carga	carga de la bomba

Todo el primer miembro de la ecuación (2) recibe el nombre de carga del sistema y se representa por h_S. El segundo miembro recibe el nombre de carga de la bomba y se suele representar por h_B. Según esto, el balance de energía mecánica puede escribirse de forma simplificada como:

$$h_S = h_B \qquad (3)$$

A la vista de la figura 3, se puede considerar que la bomba divide al sistema en dos partes: el lado de aspiración o de succión (que es el que se encuentra antes de la bomba, siguiendo el sentido de la corriente) y el lado de impulsión (que es el que se encuentra después de ella). Estos nombres derivan de la denominación de las dos bocas que tiene la bomba: la de aspiración o de succión (por donde entra el líquido) y la de impulsión (por donde sale).

En este sistema, si se toma como origen de alturas el eje de la bomba, se puede definir la carga de aspiración, h_a, como el valor de la energía mecánica que posee el líquido en la boca de aspiración de la bomba (punto a), expresado en metros de líquido y, por lo tanto, se calculará como la suma de la carga de presión y de la carga de velocidad (la carga estática será nula por el origen de alturas que se ha tomado) en la boca de aspiración, es decir:

$$h_a \equiv \frac{1}{g}\left[\frac{P_a}{\rho} + \frac{V_a^2}{2\alpha}\right] \qquad (4)$$

Se denomina carga neta de aspiración disponible en el sistema o NPSH disponible en el sistema (*Net Positive Suction Head*) a la diferencia entre la carga de aspiración y la presión de vapor del líquido a la temperatura de circulación (P°), expresadas como "cargas", es decir:

$$NPSH_{disponible} \equiv h_a - \frac{P^o}{\rho g} \equiv \frac{P_a - P^o}{\rho g} + \frac{V_a^2}{2\alpha g} \quad (5)$$

El NPSH disponible en el sistema es un concepto muy importante para determinar si se produce o no el fenómeno denominado cavitación. Por ahora es suficiente con apuntar que si su valor fuera cero o negativo, el líquido herviría en la boca de aspiración de la bomba (o incluso antes de llegar a ella). Esto puede plantear graves problemas en el funcionamiento de la bomba.

1.3. La Bomba

1.3.1. Características de una bomba

Para conseguir que el líquido se desplace con un determinado caudal por la conducción, la bomba debe suministrar al sistema una cantidad determinada de energía mecánica.

Estas dos magnitudes, la capacidad de la bomba (el caudal de líquido que es capaz de impulsar la bomba, Q_L), y la carga de la bomba (la energía mecánica que la bomba suministra al líquido expresada como "carga", h_B) son las dos características más importantes de una bomba. Pero es conveniente resaltar que, para una bomba determinada, no tienen un valor único. Esto quiere decir que según el caudal que deba impulsar la bomba, suministrará una carga distinta; y al revés, según la carga que deba suministrar en una operación, impulsará un caudal de líquido mayor o menor. En realidad, para cada bomba existe una relación entre estas dos variables, $h_B = f(Q_L)$, conocida como curva característica de la bomba. Esta relación es independiente de la densidad del líquido bombeado por estar expresada la carga como "metros de líquido". En cambio, la potencia de la bomba sí que dependerá de la naturaleza del líquido, como se verá a continuación.

El aumento de energía mecánica por unidad de tiempo (potencia, J/s ≡ W) que experimenta el líquido en la bomba viene dada por:

$$w = \hat{W}_s \cdot m = (h_B \cdot g) \cdot (Q_L \cdot \rho) \quad (6)$$

pero esta potencia aprovechada por el líquido no coincide con la consumida por el motor de la bomba, ya que en el proceso de transmisión existe una serie de pérdidas. Sólo una parte de la energía que consume el motor se aplica a la bomba; sólo una parte de la energía que llega a la bomba se aplica al líquido; sólo una parte de la energía que llega al líquido es captada por él. Se puede definir un rendimiento para cada una de estas operaciones aunque normalmente sólo se suele usar el rendimiento total de la bomba, que es el cociente entre la potencia aprovechada por el líquido y la potencia real consumida por el motor:

$$\eta = \frac{w}{w_{real}} = \frac{(h_B \cdot g) \cdot (Q_L \cdot \rho)}{w_{real}} \quad (7)$$

El rendimiento de una bomba es otra de sus características, y también depende, para cada bomba, del caudal que proporciona en cada momento.

Otra característica adicional de cada bomba es el NPSH requerido por la bomba, concepto que está relacionado, pero que no hay que confundir con el de NPSH disponible en el sistema. Se define como la energía mecánica menos la presión de vapor del líquido a la temperatura de circulación que debe poseer el líquido (expresado como carga), como mínimo, en la boca de aspiración de la bomba para que no se produzca en su interior la ebullición del líquido (cavitación), lo que plantearía graves problemas de funcionamiento. El valor del NPSH requerido por una bomba depende del caudal de líquido que circule por la misma, y normalmente aumenta al hacerlo el caudal.

Todas las características mencionadas de cada bomba aparecen en los catálogos de los fabricantes. Pueden darse en forma de tabla o en forma gráfica. En este último caso, suele representarse la carga, el rendimiento, la potencia real (en el caso en que el líquido fuera agua) y el NPSH requerido por la bomba frente al caudal impulsado por la misma. En la figura 4 puede observarse una de estas gráficas características.

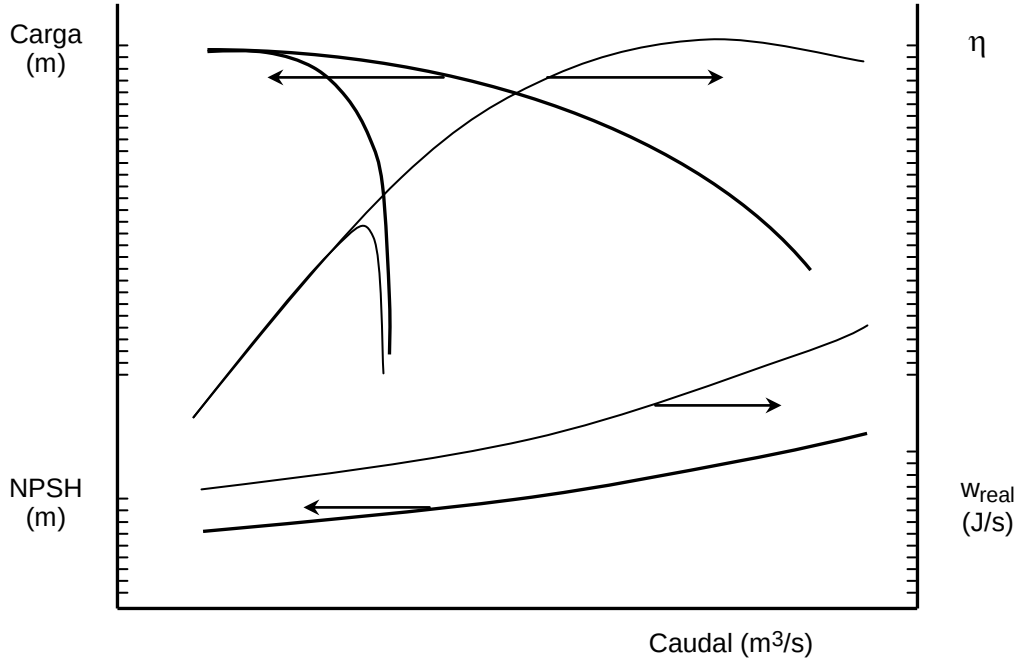

Figura 4. Curvas características de una bomba.

1.3.2. Velocidad específica de una bomba centrífuga

El término velocidad específica de la bomba es un concepto que une los tres parámetros principales de las características de funcionamiento de una bomba centrífuga (capacidad, carga y velocidad de giro) en un único término. Este concepto se define por la expresión:

$$N_S = \frac{N \cdot Q_L^{1/2}}{h_B^{3/4}} \tag{8}$$

donde: N_S : velocidad específica de la bomba centrífuga.
N : velocidad de giro de la bomba (rpm).
Q_L : capacidad de la bomba (m^3/s).
h_B : carga de la bomba (m).

pudiéndose demostrar que es independiente de la velocidad de giro N, y de la longitud característica L.

Aunque se podría calcular la velocidad específica para cualquier condición de carga y capacidad, su definición se hace para el valor de la capacidad y la carga que corresponde al punto de mayor rendimiento de la bomba.

La velocidad específica es un índice que nos da una gran información sobre el tipo de bomba centrífuga, y que hace que las bombas que tienen un determinado valor de N_S tengan unas características de funcionamiento distintas de las que tengan otro valor. Los valores de N_S suelen variar entre 10 y 300. Cuanto más pequeño sea el valor de N_S, más "centrífuga" será la bomba (es decir, mayor carga y menor capacidad) y cuanto mayor sea N_S, más "axial" será (es decir, menor carga y mayor caudal); esto está relacionado con la forma del rodete en cada caso. Otros parámetros afectados por el valor de N_S son la forma de las curvas características de la bomba y el máximo rendimiento que se pueda conseguir.

1.3.3. Cavitación de la bomba

Se han definido anteriormente dos conceptos que no deben confundirse entre sí: el NPSH disponible en el sistema y el NPSH requerido por la bomba. El primero sólo depende de la energía mecánica que posee el fluido en la boca de aspiración de la bomba. Si es positivo, el líquido no hervirá en la boca de aspiración de la bomba; si es cero, el líquido empezará a hervir exactamente en ese punto; y si es negativo, el líquido ya llegará hirviendo a la boca de aspiración de la bomba. Pero aunque el líquido llegase a la boca de aspiración de la bomba sin llegar a hervir, aún debe circular por el interior de la bomba antes de que ésta le comunique energía

mecánica y, por tanto, sigue disminuyendo la carga. Esa pérdida de carga en el interior de la bomba es el NPSH requerido por la bomba y para que no se produzca la formación de burbujas de vapor del líquido en el interior de la bomba, el NPSH disponible en el sistema ha de ser siempre superior al NPSH requerido por la bomba.

Que el líquido se vaporice parcialmente en el interior de la bomba no debería tener en sí mayor importancia, si no fuera porque las burbujas de vapor que se han formado condensan y desaparecen cuando aumenta la presión del líquido en el interior de la bomba, produciendo una disminución drástica de la carga proporcionada, y también ruidos y vibraciones que dan lugar a desperfectos mecánicos en el rodete de la bomba. Este fenómeno se conoce con el nombre de cavitación.

Cuando se produce la cavitación en una bomba, la carga proporcionada por la bomba y su rendimiento disminuyen rápidamente sin que el caudal aumente, como puede verse en la figura 4.

2. OBJETO DE LA PRACTICA

El objetivo de esta práctica es:

a) Realizar un estudio del comportamiento de una bomba centrífuga, y determinar sus características (carga, rendimiento y potencia consumida frente al caudal que proporciona) a distintas velocidades de giro.

b) Determinar la velocidad específica de la bomba.

c) Estudiar cómo y por qué aparece el fenómeno de la cavitación.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En la figura siguiente se esquematiza el montaje utilizado.

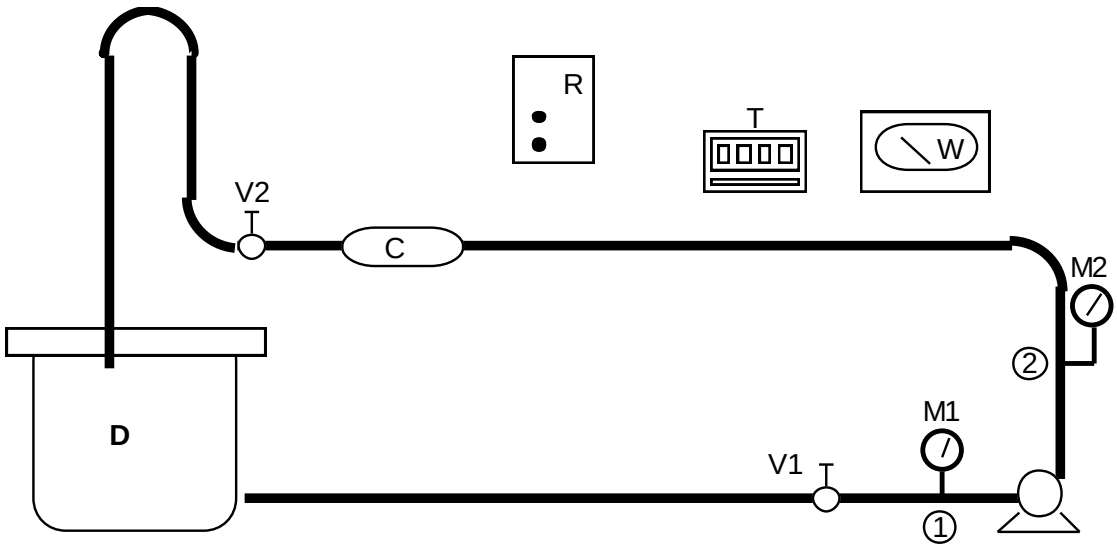

Figura 5. Esquema de la instalación.

La bomba centrífuga está instalada en un circuito formado por una conducción de cobre de 3.3 cm de diámetro, que toma y devuelve posteriormente el agua a un depósito de regulación (D).

Dos manómetros tipo Bourdon, colocados inmediatamente antes (M1) y después (M2) de la bomba, permiten medir la presión manométrica en la boca de aspiración y en las proximidades de la boca de impulsión, que serán los puntos 1 y 2 entre los que se realizará el balance de energía mecánica. La variación de altura entre los puntos 2 y 1 (z_2-z_1) se muestra en la siguiente tabla para cada uno de los montajes de la práctica:

Montaje nº	z_2- z_1 (cm)
1	40
2	50
3	55
4	50

El montaje dispone de un regulador electrónico (R) que permite variar la velocidad de giro del motor de la bomba. Esta velocidad puede medirse mediante un tacómetro digital (T). Un vatímetro (W) proporciona la potencia real consumida por la bomba.

En el montaje hay dos válvulas de bola: una de ellas (V1) en la zona de aspiración, inmediatamente antes de la bomba, y la otra (V2) en la zona de impulsión. El caudal de líquido que circula por la conducción se mide con un caudalímetro (C).

4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

4.1. Determinación de las características de la bomba centrífuga

Se realizarán cuatro series de experimentos, manteniendo en cada una de ellas una velocidad de giro de la bomba de 2700, 2400, 2100 y 1800 rpm. En cada serie se realizarán, al menos, 10-12 medidas variando el caudal que pasa por el sistema entre cero y el máximo posible, y determinando en cada medida el caudal, la carga de la bomba, la potencia consumida y el rendimiento.

4.2. Estudio de la cavitación de la bomba

Para una velocidad de giro de la bomba de 2700 rpm, y con la válvula de la zona de aspiración parcialmente cerrada, se realizará una serie de medidas, variando el caudal que pasa por el sistema entre cero y el máximo posible, y determinando en cada medida el caudal, la carga de la bomba, la potencia consumida, el rendimiento y el NPSH disponible en el sistema.

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

a) Para realizar cada una de las series a distinta velocidad de giro de la bomba, se actúa del modo siguiente:

1. En primer lugar, con las válvulas V1 y V2 totalmente abiertas, se pone en marcha la bomba a la velocidad de giro deseada, y se anota el caudal máximo. Teniendo en cuenta que hay que hacer 10-12 experimentos en cada serie, se decide qué caudales se deberán tomar, desde el caudal máximo hasta cero.

2. Se empieza a realizar las medidas de la serie, partiendo del caudal máximo (válvula V2 abierta) y se va cerrando cada vez un poco más en las sucesivas medidas de la serie, de acuerdo con lo visto anteriormente, hasta llegar a caudal cero (válvula V2 cerrada). Para cada medida, se anota el caudal de agua, P_{1man}, P_{2man} y la potencia proporcionada por el vatímetro ($w_{vatímetro}$), así como su valor inicial cuando se enciende el instrumento (w_0), que habrá que restar a todas las medidas realizadas para obtener la potencia real (w_{real}). Con estos valores se construye la tabla siguiente:

TABLA I

N = **rpm**

w_0 = W

Q_L (m^3/h)	P_{1man} (kg/cm^2)	P_{2man} (kg/cm^2)	$w_{vatímetro}$ (W)
---	---	---	---
---	---	---	---
---	---	---	---

b) Para realizar las pruebas de cavitación de la bomba, se hará girar la misma a la velocidad más alta utilizada en el apartado anterior (2700 rpm). Comenzando con las dos válvulas abiertas, se va cerrando la válvula V1 hasta que la presión manométrica leída en M1 esté alrededor de -0,9 kg/cm^2 (momento en el cual el caudal será máximo). Se deja la válvula V1 en esa posición y se anota el valor de la presión manométrica leída en el manómetro M2 (P_{2man}). Posteriormente, se cierra totalmente la válvula V2 (caudal cero) y se vuelve a anotar P_{2man}. La diferencia entre esos dos valores de P_{2man} nos dará el intervalo de valores de P_{2man} que debe cubrir todo el rango de caudales. Teniendo en cuenta que hay que hacer unos 10 experimentos en la serie de cavitación, se decide qué valores aproximados de P_{2man} se deberán tomar. De esta forma, se procede aumentando poco a poco el caudal de agua, y anotando el caudal, P_{1man}, P_{2man} y la potencia consumida, construyendo una tabla como la anterior. También será necesario medir, en este caso, el valor de la presión atmosférica. Puede considerarse que la temperatura del agua en el tanque será la temperatura ambiente en el laboratorio.

c) En todos los casos se debe tener muy en cuenta que, en cada una de las series de medidas, se tiene que mantener la velocidad de giro de la bomba en el valor deseado con una tolerancia máxima de ±5 rpm, accionando para ello, siempre que sea necesario, el regulador de velocidad. Hay que tener en cuenta que al variar el caudal dentro de una serie, se suele desajustar la velocidad de giro y se debe restaurar el valor deseado.

6. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS

1. Para cada serie realizada a distinta velocidad de giro, a partir de los datos experimentales, se construye la tabla siguiente:

TABLA II

N = rpm

Q_L (m^3/h)	h_B (m)	w_{real} (W)	η
---	---	---	---
---	---	---	---
---	---	---	---

y se representa, para todas las series en la misma gráfica, $h_B = f(Q_L)$, $w_{real} = f(Q_L)$ y $\eta = f(Q_L)$.

La carga de la bomba se puede obtener aplicando la ecuación (2) al esquema de la figura 5:

$$h_B = (z_2 - z_1) + \left[\frac{V_2^2}{2g\alpha_2} - \frac{V_1^2}{2g\alpha_1}\right] + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{\Sigma F}{g} \qquad (9)$$

Si tenemos en cuenta que la conducción es de sección constante y que, por lo tanto, las velocidades en todo el sistema son iguales, y que se puede despreciar la pérdida de carga entre los puntos 1 y 2 por ser muy corta la conducción, la ecuación (9) queda:

$$h_B = (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \qquad (10)$$

Para calcular la potencia real (w_{real}) se restará a la potencia consumida proporcionada por el vatímetro ($w_{vatímetro}$), el valor inicial (w_0).

Para calcular el rendimiento se aplicará la ecuación (7).

2. A partir de los datos de las tablas y gráficas anteriores, se determina la velocidad específica de la bomba centrífuga, utilizando la ecuación (8) aplicada al punto de mayor rendimiento para cada serie.

3. Para la serie realizada para estudiar la cavitación de la bomba, a partir de los datos experimentales, se construye la tabla siguiente:

TABLA III

D = 3.3 cm
N = rpm
P_{atm} = mm Hg
T = ºC

Q_L (m^3/h)	h_B (m)	w_{real} (W)	η	$NPSH_{disp}$
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---

y se representa, junto con la serie efectuada a la misma velocidad de giro de la bomba, $h_B = f(Q_L)$, $w_{real} = f(Q_L)$ y $\eta = f(Q_L)$.

Para calcular el NPSH disponible en el sistema a partir de la ecuación (5), teniendo en cuenta que, en nuestro dispositivo experimental, el punto a coincide con el punto 1, resulta:

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_1 - P^o}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2\alpha g} \qquad (11)$$

Las presiones que aparecen en la ecuación (11) son absolutas y expresadas en Pa. La presión de vapor del agua (P^o), a la temperatura de operación, se calcula mediante la ecuación de Antoine:

$$\ln P^o = 18.3036 - \frac{3816.4}{T - 46.13} \qquad (P^o \text{ en mmHg}; T \text{ en K})$$

La velocidad en el punto 1 (V_1) se calcula a partir del valor del caudal y de la sección de la conducción. Como la circulación será turbulenta, α=1.

7. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

1. Comentar la forma de las curvas $h_B = f(Q_L)$, $w_{real} = f(Q_L)$ y $\eta = f(Q_L)$ obtenidas. ¿Es lógica su variación con N?
2. De acuerdo con el valor de N_S obtenido, ¿de qué tipo de bomba centrífuga se trata?, ¿es muy axial o muy radial?
3. ¿Se ha logrado que la bomba cavite? ¿Cómo lo sabes? ¿Cuál es el caudal aproximado y el NPSH disponible en el sistema cuando la bomba ha empezado a cavitar?

8. BIBLIOGRAFIA

- Apuntes de la asignatura "Operaciones Básicas de Procesos Biotecnológicos"
- "Operaciones unitarias en Ingeniería de Alimentos"; A. Ibarz, G.V. Barbosa-Cánovas. Ed. Mundi-Prensa (2005)
- "Ingeniería Química. 3. Flujo de fluidos"; E. Costa Novella y otros. Ed. Alhambra Universidad (1985)