



### **Práctica 3. Ensayo de bomba centrífuga y cavitación.**

Profs. Antonio Lecuona y J. I. Nogueira, Dpto. de Ingeniería Térmica y de Fluidos

#### **Descripción**

Un grupo de alumnos obtendrá experimentalmente las curvas características de una bomba centrífuga instrumentada. Se les introducirá al análisis dimensional representando las curvas de forma adimensional.

**Duración:** 2 horas.

**Entregables:** Informe con el contenido más abajo descrito.

**Objetivos:** Entender el funcionamiento de una electro-bomba centrífuga comercial compacta. Obtener sus prestaciones y representarlas de forma adimensional. Producir la cavitación a la entrada de la bomba y estudiar su aparición y efectos.

Este documento es de preparación para el alumno, con el objeto de que durante la sesión de laboratorio conozca los objetivos de la práctica y se encuentre familiarizado con el banco de ensayos, la instrumentación empleada, la metodología a seguir y los datos que deberá obtener. Se exhorta a los alumnos a consultar con el profesor, antes de la realización de la práctica, las dudas que pudieran quedar, especialmente las relativas a la seguridad. Este documento debe ser complementado con un guión concreto que describa el banco de ensayos y su operativa, así como el procedimiento específico a seguir para efectuar la práctica.

Esta circunstancia se evaluará al comienzo de la práctica, el tutor sometiendo a los asistentes a cuantas cuestiones considere pertinente. Las contestaciones del alumno darán lugar a una calificación que se tendrá en cuenta a la hora de calificar globalmente la práctica. Si el tutor detecta un conocimiento insuficiente para permitir una realización provechosa y segura, podría impedir al alumno continuar la sesión.

La actitud provechosa y constructiva del alumno durante la realización de la práctica será evaluada y formará parte de la calificación final.

#### **Disposición experimental**

Las bombas centrífugas son ampliamente usadas en diversos sectores de nuestra sociedad, desde tamaños muy pequeños hasta grandes tamaños, de un solo escalón o de varios, denominadas entonces bombas multicelulares.

Es habitual encontrarlas arrastradas por un motor eléctrico conectable a la red, girando por ello a un régimen fijo, si el motor es síncrono, o casi constante si es asíncrono.

El acoplamiento del motor a la bomba puede ser muy variado. Un caso muy conveniente es el de bombas verticales de algunos kW con acoplamiento directo, compartiendo eje, aunque con una zona al aire que permite recoger las fugas de agua que ocurran a través del cierre mecánico. Liberando las patas de unión entre la carcasa de la bomba y del motor e instalando un rodamiento que permita el giro coaxial de la carcasa del motor, se permite instalar un brazo y una célula de carga, con lo que el par

transmitido es fácilmente medible. El eje sirve de guía en el giro y el cojinete de soporte suficiente del peso del motor. Multiplicando este par por la velocidad angular de giro, resulta la potencia real comunicada al eje de la bomba  $W_{eje}$ . Este es solo ligeramente mayor que el par comunicado al fluido, debido al rozamiento del cojinete y cierres mecánicos de la bomba.

La Figura 1 muestra una de estas bombas, instrumentada.

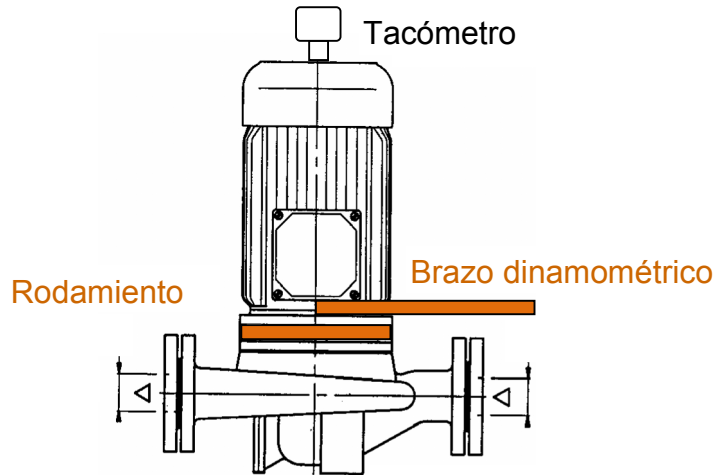


Figura 1.- Bomba eléctrica fabricada en fundición e instrumentada para su ensayo.

La bomba se monta en un circuito cerrado confeccionado de tubería de PVC, como indica la Figura 2. Se toma agua de un depósito abierto a la atmósfera, y se sitúa la bomba a menor altura que el nivel del agua, lo que garantiza su llenado. Dos válvulas, una aguas-arriba y otra aguas-abajo de la bomba permiten regular su succión a la entrada  $P_e$  y su sobrepresión a la salida  $P_s$ , pues descarga de nuevo en el depósito. Ambas presiones son medidas con sendos transductores de presión absoluta.

Un tacómetro instalado en el motor eléctrico y un caudalímetro de paletas completan la instrumentación necesaria.

Un variador de frecuencia permite ensayar a distintos regímenes.

Un tramo de tubería de PVC aguas-abajo de la válvula de succión es sustituido por tubo de metacrilato transparente. Su objeto es posibilitar la visualización de burbujas de cavitación.

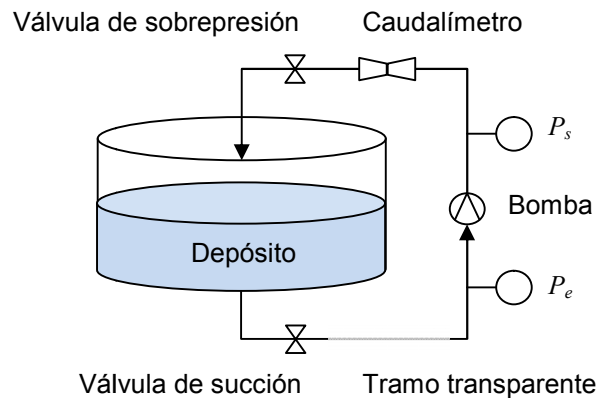




Figura 1.- Esquema de la instalación.

### Curvas características de una bomba:

Es un hecho conocido que el caudal que pasa por la bomba afecta al salto de presión (altura hidráulica, “head” en inglés) que proporcionan. Tratándose de una bomba centrífuga es de esperar que el salto de presión disminuya con el aumento del caudal hasta llegar al caudal máximo de la bomba para el cual el salto es nulo. Se trata de la marcha en vacío. De hecho, esta disminución del salto con el caudal es favorable para la estabilidad de la operación de la bomba en las instalaciones a las que irá destinada, como muestra la teoría y corrobora la práctica.

Para valorar este efecto resulta útil medir la relación salto de presión-caudal a régimen de giro constante, pues éste afecta grandemente a ambas variables operativas. Esta constancia se materializa con un motor eléctrico conectado a la red de tipo trifásico.

La comparación entre la potencia mecánica trasladada al flujo con la potencia mecánica comunicada a la bomba es el rendimiento de la misma [2]:

$$\eta = \frac{W_{fl,rev}}{W_{eje}} = \frac{Q \overbrace{\Delta P}^{P_s - P_e}}{C\omega} \quad (1)$$

En esta expresión se ha identificado la potencia mecánica trasladada al flujo con la parte reversible de toda la potencia comunicada al mismo con el producto  $Q\Delta P$ , pues al ser el tubo de salida de la bomba de igual diámetro que el de entrada (ver Figura 1), no hay salto de la energía cinética a través de la bomba. Hay otra parte del aporte de potencia al flujo que es irreversible y que se identifica con la degradación de potencia mecánica en energía térmica, que no es de interés. La potencia comunicada al eje se calcula como el producto del par en el eje, medido directamente  $C$ , por la velocidad angular de giro  $\omega = 2\pi n$ , siendo  $n$  el régimen de giro.

### Adimensionalización

La longitud característica de la bomba es el diámetro de su rotor  $D$ . Una velocidad característica es la velocidad de giro de la periferia de su rotor  $U = \omega D/2$  pues el trabajo comunicado al flujo es proporcional a su cuadrado, según la fórmula de Euler. La teoría de las turbomáquinas corrobora estas consideraciones. Para adimensionalizar las curvas características resulta pues adecuado:

$$\frac{\Delta P}{\frac{\rho n^2 D^2}{\omega U^2}} = f_1 \left( \frac{Q}{n D D^2} \right) \quad (2)$$

$$\eta = f_2 \left( \frac{Q}{n D^3} \right)$$

$\rho$  es la densidad del agua.  $f_1$  y  $f_2$  son funciones a determinar experimentalmente. En estas ecuaciones se ha despreciado el efecto del número de Reynolds, que expresa el cociente entre las fuerzas de inercia características, causantes del salto de presión y las fuerzas de viscosidad características. Ello se debe a que la baja viscosidad del agua hace



que este número característico sea mucho mayor que la unidad y en ese caso, es bien conocido que su efecto es pequeño. En ocasiones se desconoce el diámetro del rotor de la bomba, por lo que las curvas características se expresan de forma dimensional, pero “corregidas”, de tal forma que quedan:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta P}{n^2} &= f_1\left(\frac{Q}{n}\right) \\ \eta &= f_2\left(\frac{Q}{n}\right)\end{aligned}\quad (3)$$

### Cavitación

Los líquidos muestran una curva de presión de vapor  $P_{vap}$  rápidamente creciente con la temperatura (para más detalle véase la ecuación de Clapeyron). Para el agua a temperatura ambiente esta presión es de milibares y a 100 °C es una atmósfera. Aún contando con ello, es posible que una bomba haga descender la presión de un líquido a su entrada del orden de una atmósfera, por lo que es perfectamente capaz de hacer “hervir” el agua a su entrada a temperatura ambiente. Este fenómeno es conocido como “cavitación”. Al llegar las burbujas de vapor producidas al interior de la bomba, el incremento de presión hace que el vapor condense, con lo que las burbujas colapsan y en ese instante de desaparición de las burbujas se origina un pico localizado de presión capaz de erosionar el material. Por ello debe evitarse la cavitación.

Abriendo la válvula de salida de la bomba se logra que su presión de descarga sea la atmosférica, o más precisamente, ligeramente superior en las pérdidas de carga del tubo de salida. Cerrando la válvula de entrada se logra que todo el salto de presión de la bomba se invierta en producir succión. La aparición de cavitación tras la válvula se detecta por un sonido particular de siseo, parecido a la ebullición. Primero cavita la bomba, pues a su entrada los álabes bajan la presión aún más y si se cierra aún más la válvula, cavita ella misma. En el tramo transparente de tubo se podrá visualizar, con la ayuda de un estroboscopio, la aparición de burbujas e incluso su colapso. Puede que las burbujas no lleguen a la bomba, pero la baja presión a su entrada, junto con las succiones generadas por el giro de sus álabes, hace que sea posible la cavitación de nuevo en el interior de la bomba en estas circunstancias.

El efecto de las burbujas en el interior de la bomba se hace notar en las prestaciones también. El volumen ocupado por ellas reduce la densidad media del fluido, con lo que el salto de presión se resiente. Una bajada del 3% en  $\Delta P$  se reconoce que indica cavitación [3], cuando se actúa a  $n = \text{cte}$ .

### Informe

Incluirá las curvas características de la bomba  $\Delta P-Q$  y  $\eta-Q$ , obtenidas cerrando la válvula aguas-abajo de la bomba y manteniendo abierta la situada aguas-arriba (de succión o de entrada). Se obtendrán para varios regímenes de giro constante, pudiendo así observarse su efecto. Se podrá observar asimismo que no es posible actuar con  $\Delta P = 0$ , debiendo comentarse este fenómeno. La adimensionalización de las curvas mostrará que coalescen aproximadamente en una sola a distintos regímenes. El efecto del número de Reynolds y de las incertidumbres de medida hacen que esta coalescencia no sea perfecta.



La cavitación se detectará midiendo la caída de  $\Delta P$  con  $n = \text{cte.}$ , cerrando progresivamente la válvula de succión. La presión absoluta de remanso a la entrada de la bomba, cuando esto ocurre  $P_{cav}$ , en términos de altura hidráulica, se denomina *NPSH* del inglés (Net Pressure Suction Head) [1], restándole la presión de saturación del líquido bombeado  $P_{vap}$ .

$$NPSH = \frac{P_{cav} + \frac{\rho V^2}{2} - P_{vap}}{\rho g} ; V = \frac{\dot{m}}{\rho \pi D_{tubo}^2 / 4} \quad (4)$$

$P_{vap}$  es generalmente despreciable frente a la presión absoluta a la entrada de la bomba para temperaturas ambiente. Para calcular  $V$  es necesario conocer el diámetro del tubo de entrada.

### Bibliografía

- 1.- Norrie D. H., An Introduction to Incompressible Flow Machines, 1963. Edward Arnold Publishers Ltd, London.
  - 2.- Duncan W. J. Thom A. S., Young A. D., Mechanics of Fluids, 2<sup>nd</sup> edition, 1970, Edward Arnold Publishers Ltd. London.
  - 3.- Lecuona A. y Nogueira J. I., Turbomáquinas. Editorial Ariel, 2000.
-