Prácticas de Maquinas Hidráulicas

E.T.S.I. Industriales, Ciudad Real

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

Plazo de entrega de las memorias: Fecha practicas + 4 semanas
Una memoria por grupo
Modo de entrega: exclusivamente e-mail

DETERMINACION DE LAS CURVAS CARACTERISTICAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

1. INTRODUCCIÓN

Una bomba hidráulica es, por definición, una máquina que transmite energía a un fluido incompresible (agua en nuestro caso).

En la Fig. 1 se representa un esquema sencillo en el cual distinguimos el tubo de aspiración (entrada del agua) y el tubo de impulsión (salida del agua). El motor eléctrico acoplado a la bomba hace girar su rotor. Esta rotación genera un defecto de presión respecto de la presión atmosférica a la entrada del mencionado rotor. De este modo, el aire externo empuja la masa líquida dentro del rotor y el agua sale por la periferia del mismo. Como consecuencia de su viaje a través del rotor, el agua adquiere energía adicional que le permitirá salvar desniveles en los distintos tramos de su curso posterior, u obtener presión suficiente para otros usos. Hacemos aquí la observación de que, cuando la bomba está funcionando, la presión a la entrada del rotor será menor que la atmosférica. Esta presión se medirá con un vacuómetro, el cual nos da la diferencia de presión entre la entrada y la atmósfera (de ahí que la medida obtenida con el citado vacuómetro sea negativa).

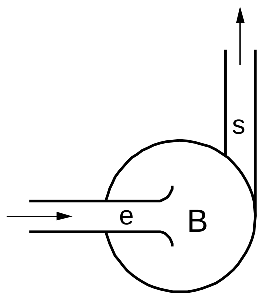

Figura 1

Si en la Fig. 1 aplicamos Bernoulli entre la entrada y la salida de la bomba, suponiendo un flujo irrotacional e incompresible y una bomba que no entrega energía, obtendremos:

$$z_s + \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} = z_e + \frac{p_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} \qquad (1)$$

donde p es la presión, v es la velocidad, ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad y *z* es la altura medida desde una referencia horizontal arbitraria. Los subíndices “e” y “s” hacen referencia a “entrada” y “salida”, respectivamente.

A consecuencia de que no se han tenido en cuenta la viscosidad del fluido, ni la turbulencia del flujo, ni la energía entregada por máquinas, no se podrá satisfacer la igualdad en la ecuación anterior. La bomba trabaja entregando energía al fluido, energía cuantificada a través de la llamada altura manométrica H_m suministrada por la bomba:

$$z_s + \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} = z_e + \frac{p_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} + H_m \qquad (2)$$

Dicha altura manométrica H_m dependerá fundamentalmente del caudal circulante a través de la bomba, la geometría del rotor, su frecuencia de rotación, etc.

Si en la ecuación anterior, despreciamos las diferencias tanto de alturas como de velocidades entre la entrada y la salida, obtenemos:

$$H_m \approx \frac{p_s - p_e}{\rho g} \qquad (3)$$

Cabe comentar el hecho de que para calcular H_m, podíamos no haber despreciado las diferencias de velocidades y de altura entre la entrada y la salida de la bomba. Así, para calcular las primeras, como conocemos el diámetro tanto de la tubería de impulsión (D_i = 34 mm) como de la tubería de aspiración (D_a = 45.2 mm), bastará con hacer lo siguiente:

$$\left.\begin{array}{l} v_a = \dfrac{4Q}{\pi D_a^2} \\ v_i = \dfrac{4Q}{\pi D_i^2} \end{array}\right\} \qquad (4)$$

Así mismo, la diferencia de altura entre la entrada y la salida de la bomba la podemos medir directamente con una regla en el banco de ensayos. No obstante, y por simplificar el análisis posterior de errores, nos quedaremos con la ecuación (3) para aproximar H_m. Por otra parte, la curva característica de una bomba, idealmente la podemos aproximar por una recta del tipo:

$$H_m(Q) = \alpha - \beta Q \qquad (5)$$

donde α y β son constantes que dependen de las características de la bomba (velocidad de giro, radio y ancho de los álabes del rotor, ángulo de los álabes, etc) y Q es el caudal que circula por la bomba.

La gráfica H_m=H_m(Q), según la ecuación (5), sería una recta con pendiente -β y ordenada en el origen α/β. En la realidad, la curva característica es no lineal y tiene la forma indicada en la Fig. 2, la cual es claramente no lineal, a consecuencia de la consideración de las pérdidas viscosas y turbulentas.

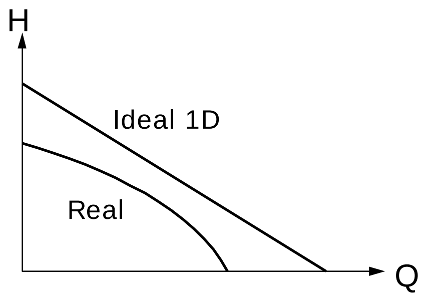

Figura 2

Una vez conocida la altura manométrica H_m para un caudal de funcionamiento Q, podemos calcular la potencia transmitida al fluido:

$$W = Q(p_s - p_e) = \rho g Q H_m(Q) \qquad (6)$$

El rendimiento total de la bomba se puede definir del siguiente modo:

$$\eta_t = \frac{W}{W_e} \qquad (7)$$

Siendo W_e la potencia eléctrica consumida por la bomba (ver vatímetro). Determinaremos experimentalmente la altura manométrica suministrada por la bomba, la potencia transmitida al fluido, así como el rendimiento total en función del caudal.

2. REALIZACION DE LA PRÁCTICA

En las Fig. 3 y 4 se muestran una vista superior y frontal del banco de ensayos de bombas serie/paralelo que constituye el equipo de prácticas.

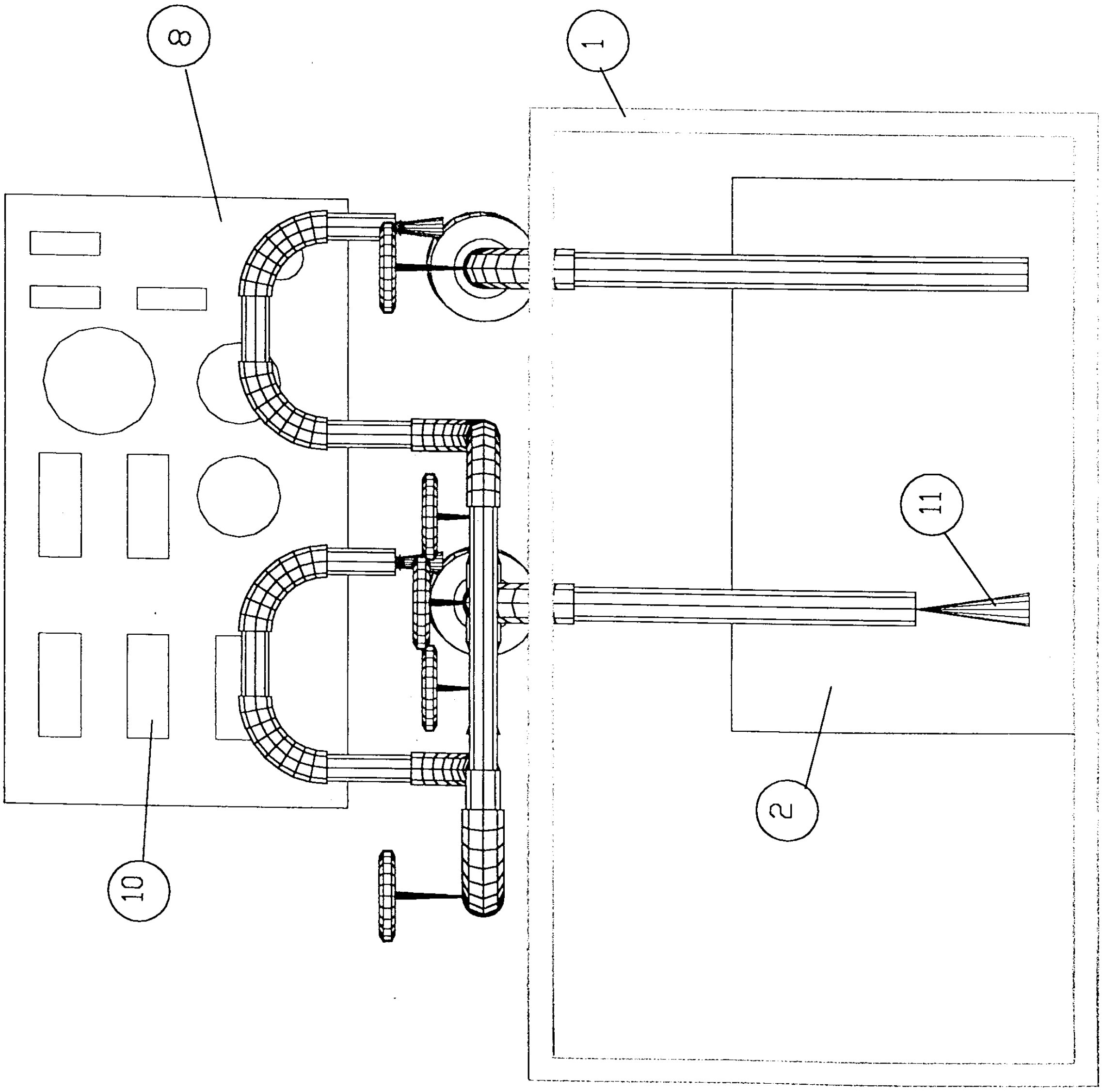

Figura 3

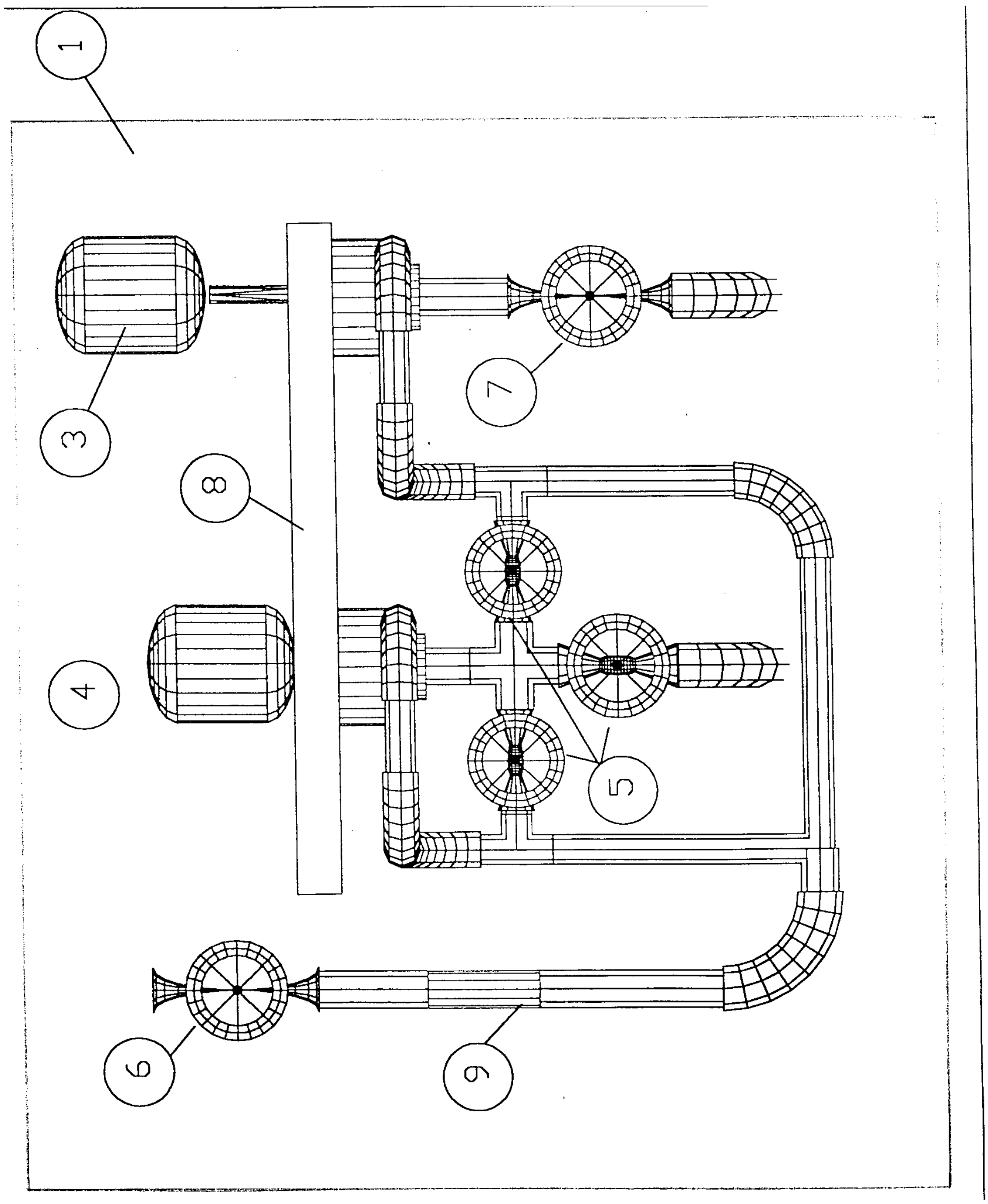

Figura 4

2.1 Obtención de las curvas características de la primera bomba a diversas frecuencias de rotación del motor.

i) Ponemos en funcionamiento la primera bomba. Para ello, conectamos el interruptor general del cuadro. Con las válvulas de aspiración e impulsión cerradas, accionamos el interruptor de la bomba o bombas que queremos poner en funcionamiento. A continuación, abrimos la válvula de aspiración y fijamos el régimen de giro de la bomba en el valor deseado **Ω_1 = 2 720 rpm**.

ii) La válvula de regulación que se encuentra en el tubo de aspiración de la primera bomba debe quedar totalmente abierta (nº 7). Con la válvula de regulación que se encuentra situada delante del caudalímetro (nº 9), variamos el caudal circulante (lo hacemos así, y no al revés, es decir, no variamos el caudal con la válvula situada en la aspiración de la bomba, para evitar problemas de cavitación). Al maniobrar las válvulas, lo haremos con cuidado, evitando las sobrepresiones, o que cualquiera de los manómetros trabaje fuera del rango de lectura. Se pueden empezar tomando una medida con la válvula cerrada (Q = 0) y otra con la válvula completamente abierta (Q_{max}.). Las otras medidas serán repartidas entre estas dos de forma que se podrá acceder a la totalidad del régimen de funcionamiento.

iii) Para los distintos caudales, se miden las presiones manométricas a la entrada y a la salida de la bomba. Para ello, disponemos de manómetros de Bourdon que miden la diferencia de presión respecto de la atmosférica. Cabe observar que las lecturas de ambos manómetros están en unidades diferentes. Cabe observar también que la presión a la entrada de las bombas es negativa aunque no lo indican claramente los manómetros.

iv) Vamos anotando en una tabla las lecturas del caudal, de las presiones a la entrada y salida, y del vatímetro W_e. Anotamos después la altura manométrica (calculada mediante la ecuación (3)) y la potencia hidráulica W (calculada con la ecuación (6)). Una vez calculada la potencia W, calculamos el rendimiento total a partir de la ecuación (7). Confeccionamos así mismo una tabla de datos y resultados como la siguiente (con en torno a 10 puntos, para así poder tener perfectamente caracterizadas las curvas características de la bomba):

v)

Puntos	**Q (m^3/h)**	**p_e (unidades)**	**p_s (unidades)**	**W_e (W)**	H_m (m.)	W (W)	η_t
1							
2							
3							
…							
10							

vi) Graficamos $H_m(Q)$, $W(Q)$, y $\eta_t(Q)$.

vii) Repetimos las operaciones anteriores con la primera bomba para un régimen de giro diferente **Ω' = 2 000 rpm**.

viii) La idea consiste en ajustar (mediante mínimos cuadrados) la nube de puntos obtenida para el conjunto de puntos (Q, H_m) a una parábola de la forma $H_m(Q) = A+BQ+CQ^2$. Tenemos por tanto una curva $H_m(Q)$, correspondiente a un régimen de giro de Ω, y otra curva $H_m'(Q')$, correspondiente al segundo régimen de giro estudiado Ω'. Como se trata de la misma bomba funcionando a diferentes regímenes de giro, podemos plantear la igualdad de parámetros adimensionales, tal y como vimos en clase:

$$\left.\begin{aligned} \frac{gH}{\Omega^2 D^2} &= \frac{gH^{'}}{\left(\Omega^{'}\right)^2 D^2} \\ \frac{Q}{\Omega D^3} &= \frac{Q^{'}}{\Omega^{'} D^3} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{H^{'}}{H} = \left(\frac{\Omega^{'}}{\Omega}\right)^2 = \alpha^2; \quad \frac{Q^{'}}{Q} = \frac{\Omega^{'}}{\Omega} = \alpha \qquad (9)$$

Por tanto, la curva característica para $\Omega^{'}$ será igual a:

$$H^{'}(Q^{'}) = A\alpha^2 + B\alpha Q^{'} + CQ^{'2} \qquad (10)$$

Se trata por tanto de comparar la curva $H_m^{'}(Q)$ obtenida ajustando la nube de puntos (Q, H_m) correspondientes al régimen de giro $\Omega^{'}$, con la curva característica (10), obtenida aplicando análisis dimensional a la curva a Ω rpm (y comprobar lógicamente que salen muy parecidas).

También podemos comparar la curva $\eta_t^{'}(Q^{'})$ a $\Omega^{'}$ rpm, obtenida aplicando análisis dimensional a la curva $\eta_t(Q)$ a Ω rpm, con la curva $\eta_t^{'}(Q^{'})$, obtenida a partir de las mediciones realizadas sobre la bomba funcionando a $\Omega^{'}$ rpm.

3.2 Obtención de las curvas características de la segunda bomba.

i) Cerramos lentamente la válvula de impulsión y apagamos la primera bomba. Encendemos la segunda bomba siguiendo las mismas precauciones que con la primera. Para esta bomba, la velocidad de giro no se puede modificar y la tomamos igual a **2900 rpm** (que es la que viene indicada en su chapa de características).

ii) Repetimos los mismos pasos que con la primera bomba y construimos las curvas características para esta bomba.

PRACTICA Nº 2: DETERMINACION DE LAS CURVAS CARACTERISTICAS DE 2 BOMBAS CENTRIFUGAS DISTINTAS ACOPLADAS EN PARALELO

1. INTRODUCCIÓN

En general, se conectan dos bombas (no necesariamente iguales) en paralelo para poder llevar a una altura dada un caudal mayor que el que cada bomba funcionando sola sería capaz de llevar.

Como dos bombas iguales acopladas en paralelo se puede considerar un caso particular de dos bombas diferentes acopladas en paralelo, realizaremos este último caso por su mayor generalidad.

En la Fig. 5 indicamos esquemáticamente la conexión en paralelo de dos bombas (que en nuestro caso concreto serán centrífugas). Está claro que la altura manométrica ideal para ambas bombas ha de ser la misma.

$$\left.\begin{array}{r} Q_p = Q_1 + Q_2 \\ H_{m,p} = H_{m,1}(Q_1) - \Delta H_1(Q_1) = H_{m,2}(Q_2) - \Delta H_2(Q_2) \end{array}\right\} \quad (11)$$

Como puede observarse en (11), el caudal que pasa por el conjunto de dos bombas acopladas en paralelo será igual a la suma de los caudales (de forma análoga a como sucede con la intensidad en un circuito eléctrico) que pasan por cada una de las bombas (dichos caudales en general serán diferentes). La altura manométrica comunicada por cada bomba será la misma (puesto que ambas bombas están en paralelo, y la altura puede equipararse a una diferencia de potencial, siguiendo con la analogía entre circuitos eléctricos y fluidos). Será la misma, aunque minorada por las pérdidas correspondientes a cada rama, que en general serán diferentes, pues estas pérdidas dependen cuadráticamente del caudal circulante (por la ecuación de Darcy-Weissbach), que en general será diferente para cada rama (sin embargo, estas pérdidas serán despreciadas en una primera aproximación, aunque estrictamente hablando deberían ser tenidas en cuenta).

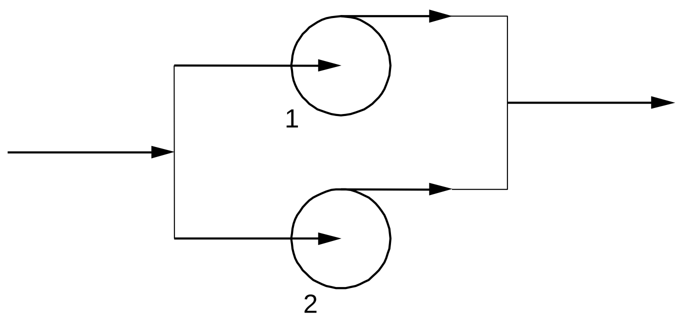

Figura 5

2. REALIZACION DE LA PRÁCTICA

i) Conectamos la primera bomba (haciéndola girar a **2 720 rpm**) y luego en paralelo con ella la segunda (que tiene un régimen de giro constante de **2 900 rpm**), teniendo las mismas precauciones que antes.

ii) Con la válvula de regulación que se encuentra delante del caudalímetro (nº 9) vamos regulando el caudal y anotamos las presiones a la entrada y a la salida de cada bomba, con lo cual calculamos las respectivas alturas manométricas en m.c.a. (las cuales, como veremos a continuación, deben salir prácticamente iguales por estar las dos bombas en paralelo, es decir, $H_1 = H_2$) Con esto, obtendremos la curva característica $H_{m,p}(Q)$ del conjunto de dos bombas en paralelo. Ajustamos la nube de puntos (Q, H_m) obtenidos a una parábola. Se trata de comparar esta parábola obtenida del conjunto paralelo de las dos bombas, con la parábola obtenida de combinar las curvas características individuales obtenidas en la práctica 1. Para ello, hacemos lo siguiente:

$$\left.\begin{aligned} H_1 &= A_1 + B_1 Q_1 + C_1 Q_1^2 \\ H_2 &= A_2 + B_2 Q_2 + C_2 Q_2^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow H_1 = H_2$$

Por tanto, despejando los respectivos caudales de las ecuaciones anteriores, obtenemos lo siguiente:

$$\left.\begin{aligned} Q_1 &= f(H_1) = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4(A_1 - H_1)C_1}}{2C_1} \\ Q_2 &= f(H_2) = \frac{-B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4(A_2 - H_2)C_2}}{2C_2} \end{aligned}\right\}$$

Se trata de comprobar, para cada caudal total que atraviesa nuestro conjunto paralelo de bombas (y que obtenemos directamente a partir de la medición del caudalímetro), que dicho caudal total es igual a la suma de Q_1 y Q_2, obtenidos a partir del conjunto anterior de ecuaciones (donde los A_i, B_i y C_i son los coeficientes obtenidos de los ajustes de las nubes de puntos de las curvas características individuales obtenidas en la práctica 1, y los H_i han sido obtenidos a partir de las mediciones de presión realizadas en esta práctica). Para ello, graficaremos simultáneamente Q_{total} frente a H, así como (Q_1+Q_2) frente a H, y comprobaremos que salen muy parecidos. Esto no equivale sino a comprobar que efectivamente se produce la esperada suma horizontal en las curvas características $H_m(Q)$ paralelo (que es en definitiva lo que está indicando el conjunto de ecuaciones (11)). Graficaremos además el error relativo absoluto cometido ($|(Q_T-Q_1-Q_2)/Q_T|$) frente a Q_T, comentando los resultados obtenidos.

PRACTICA Nº 3: DETERMINACION DE LAS CURVAS CARACTERISTICAS DE 2 BOMBAS CENTRIFUGAS DISTINTAS ACOPLADAS EN SERIE

1. INTRODUCCIÓN

Si la altura que hay que comunicar a un fluido no es alcanzable con una determinada bomba, se puede plantear la instalación de dos bombas en serie, de modo que el flujo después de pasar por la primera, pase por la segunda y las energías mecánicas aportadas por cada una se sumen.

$$\left.\begin{aligned} Q_s &= Q_1 = Q_2 \\ H_{m,s} &= H_{m,1} + H_{m,2} \end{aligned}\right\} \quad (12)$$

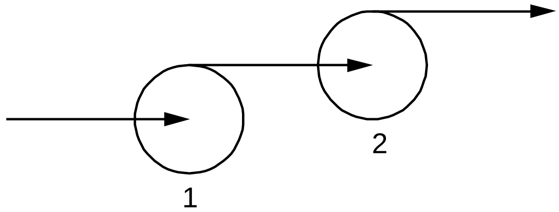

Figura 6

2. REALIZACION DE LA PRÁCTICA

i. Conectamos la primera bomba (haciéndola girar a **2 720 rpm**) y luego en serie con ella la segunda (que tiene un régimen de giro constante de **2 900 rpm**), teniendo las mismas precauciones que antes.

ii. Con la válvula de regulación que se encuentra delante del caudalímetro (nº 9) vamos regulando el caudal y anotamos las presiones a la entrada y a la salida de cada bomba, con lo cual calculamos las respectivas alturas manométricas en m.c.a. Con esto, obtendremos la curva característica $H_{m,s}(Q)$ del conjunto de dos bombas en serie. Ajustamos la nube de puntos (Q, H_m) obtenidos a una parábola. Se trata de comparar esta parábola obtenida del conjunto serie de las dos bombas, con la parábola obtenida de combinar las curvas características individuales obtenidas en la práctica 1. Para ello, hacemos lo siguiente:

$$\left.\begin{aligned} H_1(Q) &= A_1 + B_1 Q + C_1 Q^2 \\ H_2(Q) &= A_2 + B_2 Q + C_2 Q^2 \end{aligned}\right\}$$

$$\Rightarrow H_s(Q) = H_1(Q) + H_2(Q) = (A_1 + A_2) + (B_1 + B_2)Q + (C_1 + C_2)Q^2$$

Se trata de comparar (graficando simultáneamente) este $H_s(Q)$ obtenido sumando las dos curvas características individuales obtenidas en la práctica 1, con el $H_s(Q)$ obtenido en esta práctica a partir de las mediciones de presión a la entrada y la salida de cada bomba (en principio, ambas curvas características deben salir aproximadamente iguales, con lo que se verificará que, efectivamente, la curva característica $H_s(Q)$ del conjunto serie es igual a la suma vertical de las curvas características individuales, tal y como indica la ecuación (12)).

iii. El rendimiento total del conjunto serie de dos bombas. se calculará del siguiente modo:

$$\eta_{t,s} = \frac{W}{W_{B,s}} = \frac{\rho g Q H_s}{W_{B,s}} = \frac{\rho g Q H_s}{W_{B,1} + W_{B,2}}$$

donde H_s se ha obtenido a partir de las mediciones realizadas en esta práctica de las presiones, y $W_{B,s}$, a partir de las mediciones de momento y de aplicar, como ya se ha indicado, el análisis dimensional. Graficamos $\eta_{t,s}(Q)$.

APÉNDICE: ANÁLISIS DE ERRORES

Cuando representamos una gráfica experimental, en realidad no estamos aportando apenas información si cada punto no está acompañado de sus correspondientes barras de error (que nos dan una idea de si la medida es buena o mala). Será pues necesario tomar errores de todas y cada una de las mediciones realizadas. Así, por ejemplo, para un aparato analógico, como pueda ser alguno de los barómetros utilizados en las prácticas, el error mínimo se corresponde con la mitad de la mínima división del aparato. Por otra parte el caudalímetro, por ejemplo, es digital, pero está sometido a fluctuaciones más o menos importantes. Tomaremos por tanto para cada punto, un valor máximo de caudal, un valor mínimo y el valor medio será el caudal para el punto considerado. Así mismo, la mitad de ese intervalo entre Q_{min} y Q_{max} será el error cometido en la medición del mencionado caudal.

El análisis de errores lo realizaremos mediante el método de la propagación de errores. Sea una magnitud, que a su vez depende de otras magnitudes como puede ser por ejemplo el rendimiento total. El análisis de su error se haría del modo siguiente:

$$\eta_t = \frac{W}{W_B} \Rightarrow \Delta\eta_t = \left|\frac{\Delta W}{W_B}\right| + \left|\frac{-W}{W_B^2}\Delta W_B\right|$$

Otro ejemplo que podemos hacer es el error cometido en la potencia hidráulica:

$$W = \rho g Q H_m = \frac{98.1}{36} Q(m^3/h) H_m (m.c.a.) \Rightarrow \Delta W = \left|\frac{98.1}{36} Q \Delta H_m\right| + \left|\frac{98.1}{36} H_m \Delta Q\right|$$

Por convenio, en las medidas de error tomaremos dos cifras significativas, con lo cual el error llegará hasta esas dos cifras significativas, es decir, si por ejemplo:

$$\Delta\eta_t = 0.054324 \quad y \quad \eta_t = 0.749587 \Rightarrow \Delta\eta_t = 0.054 \quad con \quad lo \quad cual \quad \eta_t = 0.749$$

En consecuencia, para todas las gráficas que realicemos, cada punto experimental deberá estar acompañado de sus correspondientes barras horizontales y verticales de error, que nos van a dar una idea de cuán exacta es la medición concreta realizada. Cuando ajustemos mediante mínimos cuadrados la nube de puntos obtenida, la curva del ajuste deberá tocar en algún punto a todas estas barras de error.

Realizaremos para terminar unas pequeñas consideraciones adicionales. La primera hace referencia al hecho de que los manómetros de entrada de las bombas nos dan la presión en cm de *Hg*. Debemos por tanto pasar esos cm de *Hg* a m.c.a. Para ello, haremos lo siguiente:

$$\rho_{ag} g h_{ag} = \rho_{mer} g h_{mer} \Rightarrow h_{ag} = \frac{\rho_{mer} g h_{mer}}{\rho_{ag} g} = \frac{13600 \cdot 0.01 \cdot h_{mer}(cm)}{1000} = 0.136 h_{mer}(cm)$$

La potencia comunicada al fluido por la bomba, a su vez, se calculará del siguiente modo:

$$W = \rho g Q(m^3/h) H_m (m.c.a.) = \frac{1000 \cdot 9.81}{3600} Q(m^3/h) H_m (m.c.a.) = \frac{98.1}{36} Q(m^3/h) H_m (m.c.a.)$$

La idea de calcularla así es para poder tomar los datos directamente de las tablas, puesto que el caudalímetro da la medida de caudal en m^3/h.