

BOMBAS EN SERIE Y EN PARALELO

I.1.OBJETIVO

- Identificar el funcionamiento de un conjunto de bombas conectadas tanto en serie como en paralelo.
- Establecer la curva característica de la bomba tanto en serie como en paralelo.
- Medir los caudales y presiones para el montaje en serie y en paralelo.

I.2.EQUIPO

TecQuipment H32 Series and Parallel Pump Test Set, Hydraulic Bench H1D.



Fuente: http://www.tecquipment.com/Datasheets/H32_1110.pdf

Fig. 1 Montaje experimental de bombas en serie y en paralelo

Otros elementos

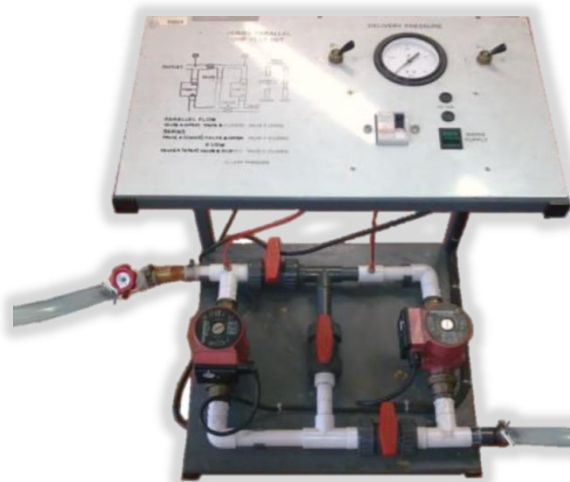
Cronómetro

Descripción de la instalación

El equipo de bombas en serie y en paralelo está diseñado para ser utilizado con el banco hidráulico gravimétrico o con el banco hidráulico volumétrico.

Dos bombas centrífugas similares se conectan a un sistema de tuberías donde cada bomba puede funcionar tanto en serie como en paralelo. La práctica se desarrolla para un sistema con una única bomba para obtener valores aproximados a la realidad (UNICAUCA, s.f., p2).

Cada bomba está provista de un panel de control el cual facilita el encendido o apagado junto con un control de tres velocidades. En la parte superior del panel se tiene un indicador que permite la medición de la presión en cada una de las bombas. El caudal se ajusta haciendo uso de la válvula de salida dispuesta en la tubería de retorno entre la bomba de prueba y el banco hidráulico.



Fuente: Propia

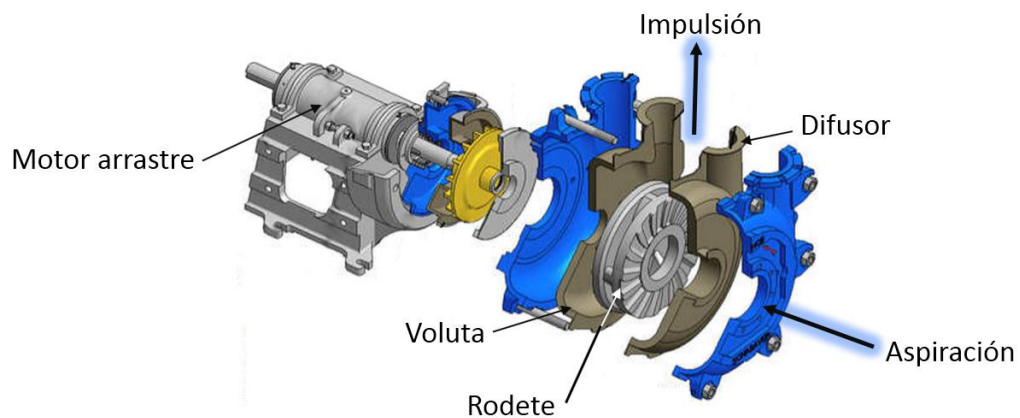
Fig. 2 Montaje experimental de bombas en serie y en paralelo

I.3.MARCO TEÓRICO

Las bombas son turbo máquinas que transfieren energía mecánica a la energía del fluido, por tanto la energía del fluido se incrementa a través de la bomba. La energía es suministrada por la turbina, la cual es impulsada por un motor eléctrico o cualquier otra unidad (UNICAUCA, s.f., p3).

Estas máquinas son utilizadas para transferir fluido en un sistema, ya sea al mismo nivel o a un nivel más elevado. La tasa de flujo depende de la altura a la cual el fluido es bombeado y la relación entre “altura” y tasa de flujo es conocida como característica de la bomba. Un error común acerca de las bombas es pensar que ellas crean presión. Con una única bomba no se crea presión para entregar al caudal de flujo sino ella solo desplaza el fluido, por tanto son necesarias dos o más bombas para crear presión. Estas pueden ser combinadas en serie para incrementar la altura a la cual el fluido puede ser bombeado o combinadas en paralelo para incrementar la tasa de flujo. En este experimento se demuestran las características de las bombas combinadas y en serie respecto a una única bomba (DÍAZ, s.f., p2).

1.3.1. La bomba Centrífuga



Adaptado de: <http://www.weirminerals.com/images/sch-c-exploded---large-correct.jpg>

Fig. 3 Partes de una bomba centrífuga

Los elementos constructivos de la bomba son:

- Rodete: Elemento móvil solidario el eje del motor el cual gira en sentido anti horario y transmite velocidad al fluido. Está formado por unos álabes curvados hacia atrás.

- Carcasa: Rodea al rodete para recoger el fluido que atraviesa los álabes del mismo. Tiene una parte con forma toroidal que recibe el nombre de voluta.
- Difusor: Parte final de la carcasa donde se reduce sustancialmente la velocidad del fluido y por tanto se transforma en presión (GARCÍA, 2006, p. 193).

1.3.2. Potencia en Bombas

La potencia dada al fluido por la bomba se denomina N_{util} y viene dada por la expresión:

$$N_{util} = H * \gamma * Q$$

La potencia necesaria para mover la bomba que produzca la potencia anterior se denomina potencia en el eje o potencia al freno y viene expresada como:

$$N_{eje} = w * M$$

donde:

N_{eje} = Potencia al freno o en el eje

w = Velocidad angular de giro del eje del motor

M = Par motor desarrollado por el eje del motor

Existen unas pérdidas de energía en la transformación de energía mecánica en energía hidráulica. A la relación se le denomina rendimiento y la forma de obtenerlo es como la relación de potencias útil y en el eje:

$$\eta = \frac{N_{util}}{N_{eje}} = \frac{H * \gamma * Q}{w * M}$$

Este rendimiento se debe básicamente a tres factores: rendimientos volumétricos, hidráulicos y mecánicos (GARCÍA, 2006, p. 194).

• **Rendimiento volumétrico η_v :**

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q_c}$$

donde:

η_v = Rendimiento volumétrico

Q = Caudal de entrada a bomba

Q_c = Caudal perdido en la holgura entre rodete y carcasa

• **Rendimiento hidráulico η_H :**

$$\eta_H = 1 - \frac{\Delta H}{H}$$

donde:

η_H = Rendimiento hidráulico

H = Altura manométrica bomba

ΔH = Pérdidas de carga debidas al acoplamiento imperfecto entre el flujo de entrada y los álabes, rozamiento en los álabes y acoplamiento imperfecto entre álabes y la salida, provocando recirculación (GARCÍA, 2006, p. 195).

• **Rendimiento Mecánico η_m :**

$$\eta_m = 1 - \frac{N_{rozamiento}}{N_{eje}}$$

donde:

η_m = Rendimiento mecánico

$N_{rozamiento}$ = Potencia perdida en cojinetes, rodamientos y otros
elementos mecánicos de la bomba

N_{eje} = Potencia suministrada al eje por el motor

El rendimiento global de la bomba será siempre:

$$\eta = \eta_v * \eta_m * \eta_h$$

1.3.3. Curvas características en bombas

Estas curvas son obtenidas por el fabricante ensayando la bomba en un banco de prueba. Las curvas de mayor interés son:

- $H = H(Q)$ ó curva motriz
- $P = P(Q)$ ó curva de potencias
- $\eta = \eta(Q)$ ó curva de rendimiento

Curva motriz: (a velocidad de giro constante)

Relaciona la altura manométrica que proporciona una bomba en función del caudal que transporte. Esta curva indica la capacidad de la máquina para transmitir energía al fluido y permite la selección de la bomba.

Se entiende la altura manométrica como el incremento de energía que experimenta el fluido obtenido por la diferencia entre la presión a la entrada y salida de la bomba.

$$H_b = \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_s - \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_e$$

En la práctica $z_s = z_e$ y $V^2/2g$ es despreciable o nula en el caso de que los diámetros a la entrada y salida en las conducciones sean los mismos. Por tanto:

$$H_b = \left(\frac{P}{\gamma} \right)_s - \left(\frac{P}{\gamma} \right)_e$$

Las curvas matrices adoptan la siguiente expresión analítica:

$$H_b = c + dQ + eQ^2$$

$$H_b = c + dQ^2$$

Los coeficientes **c**, **d**, y **e** pueden ajustarse por mínimos cuadrados haciendo uso de los datos experimentales del banco de prueba (GARCÍA, 2006, p197).

Curva de potencia: (a velocidad de giro constante)

Se ha definido la potencia útil como aquella que la máquina transmite al fluido mientras que para poder aplicar esta potencia, la bomba absorbe la potencia al eje o la potencia de freno.

La potencia que interesa al usuario de una bomba es la absorbida, por tanto la curva característica de potencia $P=P(Q)$ relaciona la potencia absorbida en función del caudal trasegado. Esta curva no responde a una ecuación analítica definida (GARCÍA, 2006, p197).

Curva de Rendimiento:

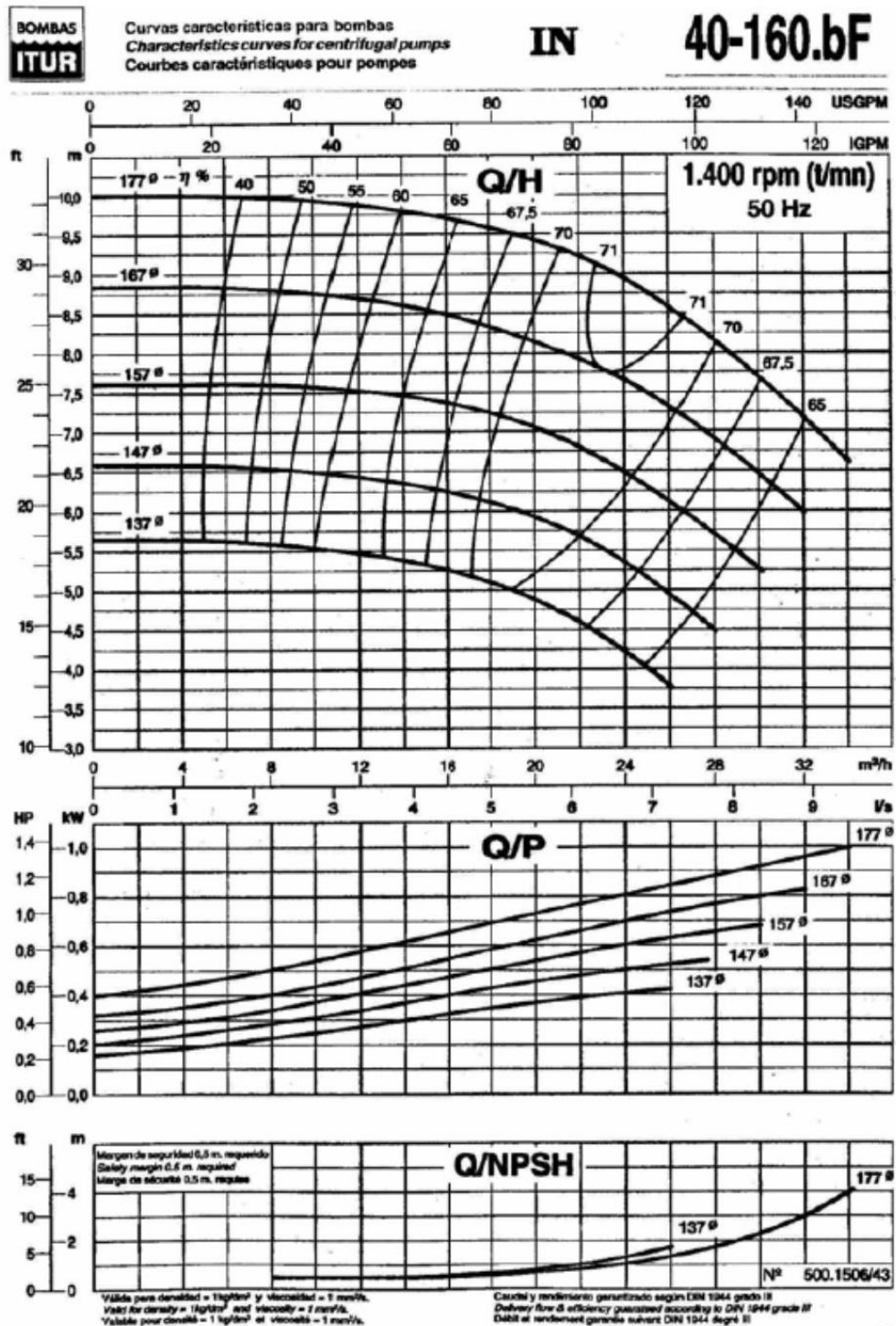
El rendimiento global de la bomba se define como el cociente entre potencia útil y potencia absorbida por la bomba. La curva característica de rendimiento $\eta = \eta(Q)$ explica la evolución del rendimiento global en función del caudal trasegado.

Las curvas de rendimiento se adaptan a una expresión analítica del tipo:

$$\eta = eQ + fQ^2$$

Los coeficientes al igual que en la curva motriz pueden ser obtenidos ajustando los puntos experimentales por mínimos cuadrados.

En la Fig. 4 se pueden observar las curvas características de una bomba centrífuga obtenida de un catálogo comercial.



13

ftp://ftp.ehu.es/cidirb/profs/inpibbeg/material/10_11_abacos/10_11_08_1_catalogo_bombas_ABACOS.pdf

Fig. 4 Curvas características bomba horizontal

1.3.4. Velocidad específica o N^o específico de revoluciones

Se define la velocidad específica o No. específico de revoluciones como la velocidad a la que tardaría en girar una bomba semejante para elevar un caudal de $1\text{m}^3/\text{s}$ a 1m.c.a. de altura. La expresión que permite obtener la velocidad específica es:

$$\eta_q = N \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

donde:

η_q = Velocidad específica, en rpm

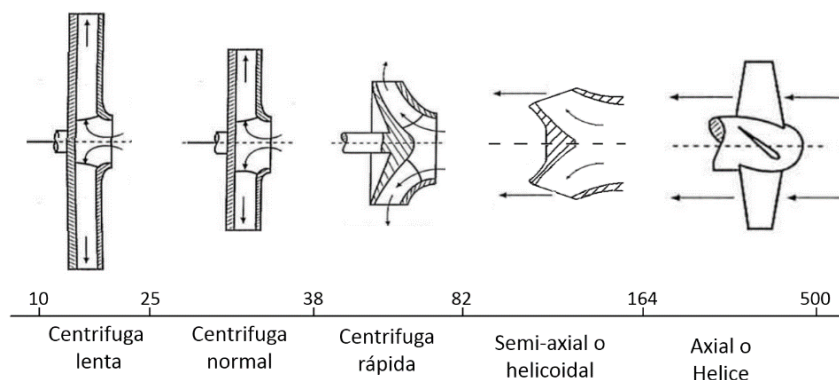
N = Velocidad nominal, en rpm

Q = Caudal en m^3/s

H = Altura manométrica, m.c.a.

De la expresión anterior se deduce que η_q es una constante para todas las bombas que resultan geoméricamente semejantes, por lo que este parámetro permite clasificar morfológicamente las máquinas.

A medida que disminuye el diámetro del rodete, la altura que ésta puede generar disminuye mientras que el caudal aumenta. Así podemos clasificar bombas según la siguiente figura (GARCÍA, 2006, p198).



Fuente: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"

Fig. 5 Evolución de η_q con la forma del rodete

1.3.5. Curvas características a velocidades distintas de la velocidad nominal

Las curvas características, motriz y de rendimiento de una bomba vienen dadas por las expresiones:

$$H_o = c - dQ_o^2$$

$$\eta_o = eQ_o - fQ_o^2$$

De acuerdo con las leyes de semejanza al modificar la relación de las velocidades de giro $\alpha = n/n_o$ se afecta el funcionamiento de la bomba de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{n}{n_o} = \frac{Q}{Q_o} = \sqrt{\frac{H}{H_o}}$$

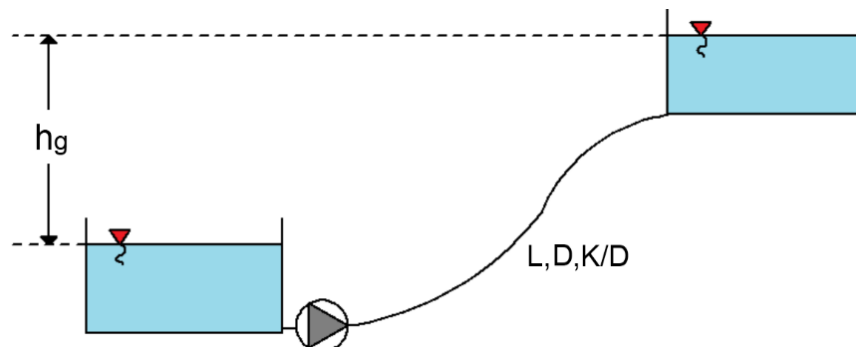
Sustituyendo estas expresiones en las curvas motriz y de rendimiento:

$$H_o = \alpha^2 c - dQ_o^2$$

$$\eta_o = \frac{eQ_o}{\alpha} - f\left(\frac{Q}{\alpha}\right)^2$$

1.3.6. Punto de funcionamiento de una instalación

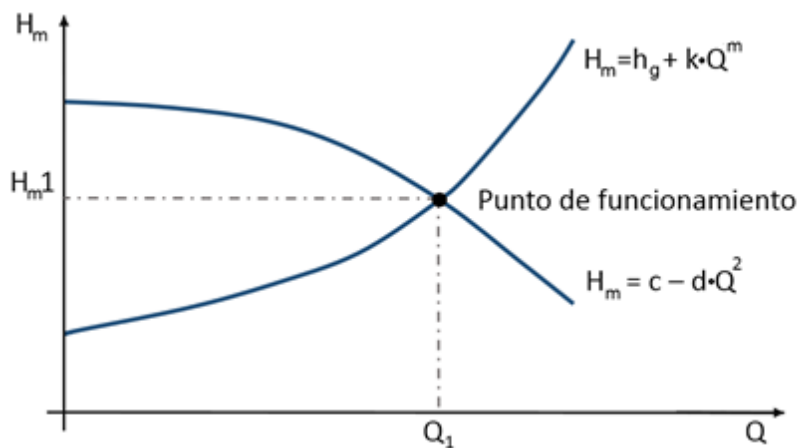
Prácticamente, una bomba no trabaja descargando el fluido al vacío sino que lo hace conectada a una instalación que condiciona su funcionamiento. Se sabe que la altura manométrica que es capaz de proporcionar la bomba es función del caudal trasegado describiendo una función decreciente del tipo $H_m = c - d \cdot Q^2$, donde c representa la ordenada en el origen, es decir la máxima altura proporcionada por la bomba para caudal nulo, mientras que $d \cdot Q^2$, corresponde a la pendiente de la curva en cada punto (GARCÍA, 2006, p116).



Adaptado de: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"

Fig. 6 Desnivel geométrico

De igual forma se puede modelar el comportamiento resistente de la tubería a la cual se conecta la bomba. Se tiene un desnivel geométrico a vencer que va desde la lámina libre en la aspiración hasta la lámina libre en la descarga, denominado desnivel geométrico h_g .



Fuente: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"

Fig. 7 Punto de funcionamiento

Este es un valor constante que solo depende de la instalación y no del caudal transportado. Por otra parte, la tubería de impulsión tiene unas características en cuanto a la longitud, diámetro y rugosidad (de acuerdo con

el material) a partir de los cuales se pueden calcular las pérdidas de carga. No obstante este valor depende del caudal el cual es aún una variable a determinar (GARCÍA, 2006, p116).

A partir de cualquier fórmula de pérdidas de carga se pueden agrupar los datos de la tubería en una constante, la cual estará en función del caudal:

$$h_r = 0.0826 * f * L * \frac{Q^2}{D^5} = KQ^2 \quad \text{Darcy – Weisback}$$

$$h_r = 10.62 * C^{-1.85} * L * \frac{Q^{1.85}}{D^{4.87}} = KQ^{1.85} \quad \text{Hazen – Williams}$$

$$h_r = 0.00092 * L * \frac{Q^{1.8}}{D^{4.8}} = KQ^{1.8} \quad \text{Veronesse – Datei}$$

Por consiguiente, la altura que deberá proporcionar la bomba viene dada por la suma de la altura geométrica más las pérdidas de carga proporcionales al caudal:

$$H_m = h_g + KQ^m$$

h_g representa la ordenada en el origen, es decir la mínima altura que debe aportar la bomba para transportar caudal nulo. El punto de funcionamiento del conjunto bomba + instalación queda fijado por la intersección de las curvas motriz y resistente de la tubería (GARCÍA, 2006, p118).

Analíticamente se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones:

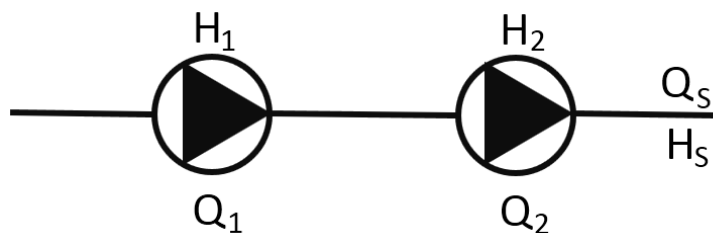
$$H_m = h_g + KQ^m$$

$$H_m = c - dQ^2$$

1.3.7. Asociación de bombas

Las bombas pueden asociarse principalmente de dos formas: en serie o en paralelo, en función del efecto buscado (GARCÍA, 2006, p118).

Bombas en serie:



Fuente: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"

Fig. 8 Asociación en serie de bombas

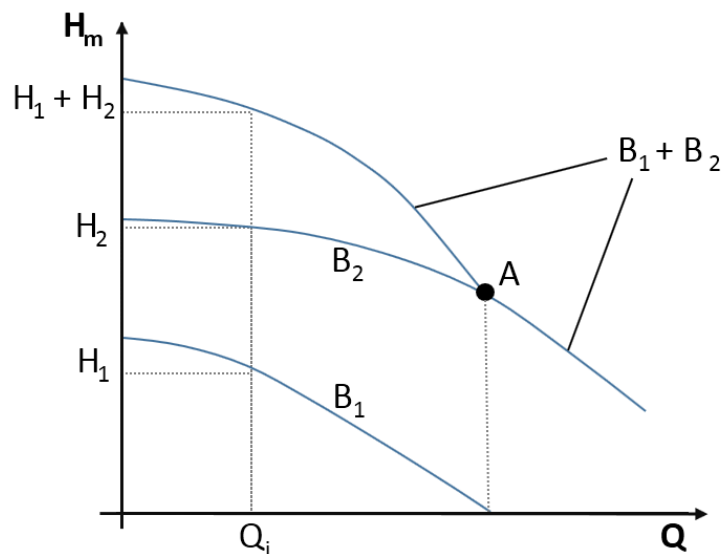
La asociación en serie se verifica cuando:

$$Q_1 = Q_2 = Q_s$$

$$H_s = \sum H_i = H_1 + H_2$$

El caudal de impulsión de una bomba se convierte en el caudal de aspiración de la siguiente. La finalidad de esta asociación es bombear un mismo caudal a una altura tal que un solo grupo sería incapaz de hacerlo.

La curva característica de la asociación se obtiene sumando alturas para cada caudal.



Fuente: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"
Fig. 9 Curva motriz asociación de bombas en serie

La asociación siempre debe funcionar a la izquierda del punto A.

Analíticamente la asociación se resuelve con una curva motriz resultante de la suma de las curvas individuales si son diferentes, o multiplicando la curva motriz por n siendo n el número de grupos iguales (GARCÍA, 2006, p118).

Distintas

$$\begin{aligned}
 &H_1 = C_1 - d_1 Q^2 \\
 &+ \\
 &H_2 = C_2 - d_2 Q^2 \\
 &\hline
 &H_T = (C_1 + C_2) - (d_1 + d_2) Q^2
 \end{aligned}$$

Iguales

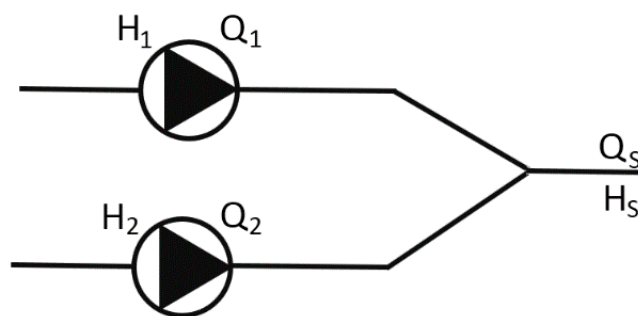
$$\begin{aligned}
 &H = c - d Q^2 \\
 &H_T = n * (c - d Q^2)
 \end{aligned}$$

Bombas en Paralelo

La asociación de bombas en paralelo se verifica cuando los caudales de impulsión de cada bomba se unen a la salida de las bombas. Las aspiraciones son por tanto independientes. En esta situación se cumple:

$$Q_s = Q_1 + Q_2 = \sum Q_i$$

$$H_1 = H_2 = H_s$$

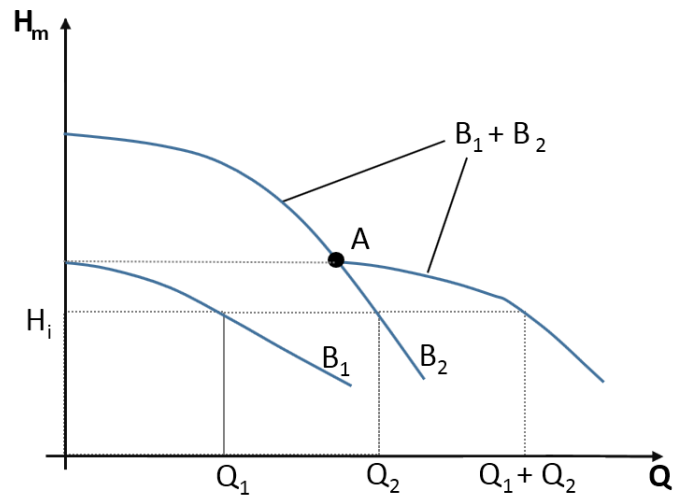


Fuente: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"

Fig. 10 Asociación en paralelo de bombas

Esta asociación es empleada en situaciones en las que el caudal de bombeo es variable en el tiempo. Las bombas arrancan progresivamente en función de la demanda (GARCÍA, 2006, p118).

La curva característica de la asociación se obtiene sumando caudales para cada altura.



Fuente: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"
Fig. 11 Curva motriz de asociación en paralelo de bombas

La asociación siempre debe funcionar a la derecha del punto A.

Para obtener analíticamente la curva motriz se debe despejar el caudal de cada una de las curvas motrices individuales y sumarlo.

$$H = C_1 - d_1 Q^2 \quad \rightarrow \quad d_1 Q^2 = C_1 - H \quad \rightarrow \quad Q = \sqrt{\frac{C_1 - H}{d_1}}$$

$$H = C_2 - d_2 Q^2 \quad \rightarrow \quad d_2 Q^2 = C_2 - H \quad \rightarrow \quad Q = \sqrt{\frac{C_2 - H}{d_2}}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 = \sqrt{\frac{C_1 - H}{d_1}} + \sqrt{\frac{C_2 - H}{d_2}}$$

En el caso más habitual de que las bombas sean todas iguales el caudal se divide por el número de grupos iguales **n** (GARCÍA, 2006, p121).

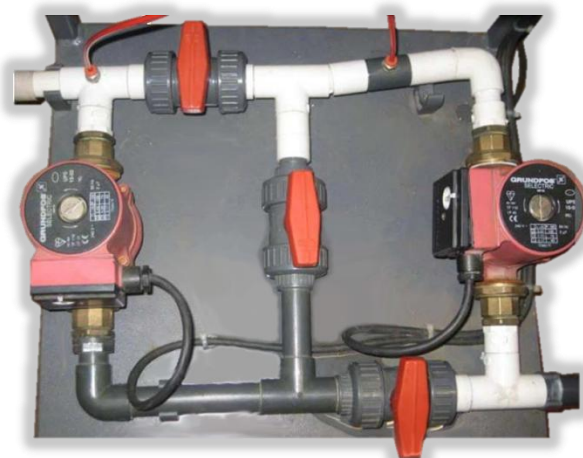
$$H = C - d Q^2 \quad \rightarrow \quad H_T = c - d \left(\frac{Q}{n} \right)^2$$

I.4.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Esta práctica se desarrolla para bombas en serie y en paralelo, el sistema está montado en un bastidor modular auto contenido y fácilmente conmutable de una posición a otra, abriendo y cerrando las válvulas de la tubería de interconexión.

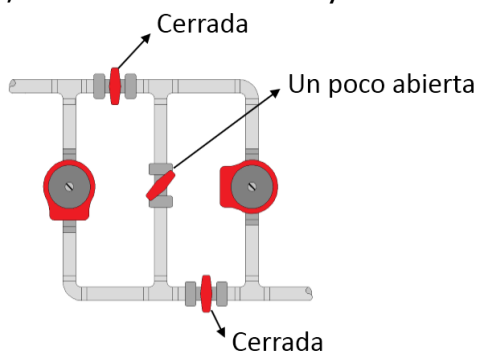
- Se conectan las bombas bien sea en serie o en paralelo.
- Se afora con diferentes caudales.
- Se miden las presiones manométricas respectivas.
- a. Fijar las velocidades en las bombas (750 rpm, 1150 rpm, 1850 rpm)
- b. Encender la unidad con el botón verde de la consola.
- c. Establecer descarga libre ajustando la válvula de compuerta ubicada en la salida de las bombas.
- d. Es conveniente empezar con la válvula completamente abierta, y terminar con la válvula cerrada.
- e. Medir los caudales haciendo usos del banco volumétrico.
- f. Leer la presión en la bomba y consignar los valores en la tabla. Repetir para diferentes caudales hasta que la válvula este completamente cerrada.
- g. Medir la diferencia de altura entre la superficie del agua a bombear y la salida de la bomba.

Cuando las bombas están en serie se suman las presiones y el caudal es constante, se toman tres caudales diferentes para este procedimiento; cuando las bombas están en paralelo se suman los caudales y la presión es constante, se toman tres caudales diferentes para este procedimiento.

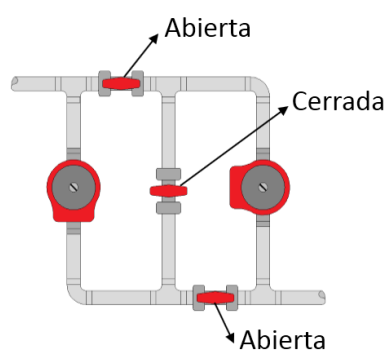


Fuente: Pérez R., H. (2011) "Guías para prácticas de laboratorio mecánica de fluidos"

- Se toman las bombas, se conectan en serie y se mide la presión.



- Se toman las bombas conectadas en paralelo y se miden las presiones.



- Se toman medidas de caudal real
- La válvula debe cerrarse de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ vuelta para cada medición. Cuando los caudales son muy pequeños, se hace más práctico el uso de la probeta para medirlos.

I.5.CALCULOS

$$H_B = H_1 = H_2$$

$$Q_B = Q_1 = Q_2$$

Eficiencia de una bomba

$$\text{Energía } E = YHV$$

$$\text{Potencia } P = dE/dt$$

$$P = YH(dE/dt)$$

$$\text{Por definición de gasto } P = YHQ$$

en donde:

$$Y = \text{Peso específico } (Kg/m^3)$$

$$H = \text{Energía respecto a un datum (m)}$$

$$Q = \text{Caudal } (m^3/s)$$

$$P = \text{Potencia del liquido } (Kgm/s)$$

Si P_n = Es la potencia nominal de la maquina y η su eficiencia se tiene:

$$H = \frac{\eta P_n}{YQ}$$

$$\eta = \frac{HYQ}{P_n} = \frac{P_{Hidráulica}}{P_{motor}}$$

Teniendo en cuenta que $\Delta p = YH$

También se aplica la ecuación de bernoulli en una bomba

1. Determine las tasas de flujo
2. Determine la presión a la entrada y la presión a la salida tomando la diferencia de elevación entre los medidores de presión y la red de bombeo en consideración.

3. Determine la altura de bombeo para las diferentes tasas de flujo en cada configuración.
4. Dibuje la altura de bombeo (m) vs. tasa de flujo (L/s) para la bomba 1, la bomba 2, la conexión en serie, y la conexión en paralelo en la misma gráfica.
5. Discuta la tendencia de las curvas para cada uno de los dibujos. Son razonables o no, explique brevemente.

I.6.ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

1. ¿Qué sugerencias tiene para mejorar el aparato?
2. Explique las leyes de semejanza en bombas.
3. Explique el fenómeno de cavitación en bombas y cómo se comprueba la condición de no cavitación.
4. Tiene alguna influencia la presión atmosférica local en la selección de una bomba centrífuga, explique.
5. Que influencia tiene la viscosidad del fluido en la forma del rodete de una bomba centrífuga.
6. Explique cómo funcionan las bombas auto-cebantes.
7. Estime el máximo porcentaje de inexactitud de las lecturas de H , Q , ω y M . Utilice estos estimativos para valorar las inexactitudes en el máximo porcentaje consiguiente en η (rendimiento), KQ (coeficiente de flujo), y KH (coeficiente de carga) derivada de sus mediciones.

I.7.HOJA DE RESULTADOS

DATOS EN SERIE	VOLUMEN	TIEMPO	P_1 (bar)	P_T (bar)
1				
2				
3				

DATOS EN PARALELO	VOLUMEN	TIEMPO	PRESIÓN (bar)
1			
2			
3			

SERIE	CAUDAL	PRESIÓN (bar)
1		
2		
3		

PARALELO	CAUDAL	PRESIÓN (bar)
1		
2		
3		

<i>Velocidad</i>	<i>Potencia (watts)</i>	<i>RPM</i>
1	40	750
2	70	115
3	105	1850

I.8.BIBLIOGRAFÍA

CHAPARRO R., F.A.; León P., L. (2004) "*Elaboración de la documentación requerida para un sistema de gestión de la calidad basado en las normas ISO 9001:2000 e ISO 1705 para los laboratorios de suelos, hidráulica y ensayos mecánicos de la universidad Santo Tomás*" Proyecto de Grado. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Bogotá D.C. 2004.

GARCÍA P, A. (2006) "*Hidráulica Prácticas de Laboratorio*", Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Escuela Politécnica Superior de Gandía, Universidad Politécnica de Valencia, Editorial de la UPV.

MARKLAND, E. (1994) "*A first course in Hydraulics*" by Emeritus Professor E. Markland, Published by TecQuipment Limited, 1994. Recuperado de: http://www.dcu.ie/sites/default/files/mechanical_engineering/pdfs/manuals/H32%20pump_test_set.pdf. Fecha de recuperación: 1 de agosto de 2013.

PÉREZ R., H. (2011) "*Guías para prácticas de laboratorio mecánica de fluidos*", Motobombas Serie y Paralelo, versión 2, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás.

DÍAZ P., Bombas centrífugas y volumétricas (2011). Departamento de ingeniería. Universidad de Cantabria. Recuperado de: http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/bombas-centrifugas-y-volumetricas.pdf. Fecha de recuperación: 1 de agosto de 2013.

MORENO A., Grupo de bombeo II, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola ciudad Real, Recuperado de: <http://www.ingenieriarural.com/Hidraulica/Temas/Tema13.pdf>. Fecha de recuperación: 1 de agosto de 2013.

Bombas y sistemas de bombeo. Universidad del Cauca (UNICAUCA), departamento de hidráulica. Recuperado de: http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/14_bombas.pdf. Fecha de recuperación: 1 de agosto de 2013.