

7. FUNCIONAMIENTO DE BOMBAS ROTODINÁMICAS

7.1. INTRODUCCIÓN

Dada la organización de los temas que conforman este libro, hasta este punto se han estudiado la morfología y las características de una bomba rotodinámica, sin mencionar para nada el funcionamiento a que estará sometida. No obstante ello, en este capítulo se analizará el comportamiento de las bombas rotodinámicas, considerando las características de la instalación en la que funcionará. En dicho análisis, se determinará el punto de trabajo (punto de funcionamiento, PF) de una bomba, el cual, como se verá más adelante, depende de la característica motriz (curva motriz) de la bomba en estudio, y de la característica resistente (curva resistente) de la instalación o sistema.

El estudio del funcionamiento de una instalación simple (operando una sola bomba), o el de dos o más bombas, operando simultáneamente, se puede abordar tanto analítica como gráficamente. Este último tratamiento presenta la ventaja de ser más claro e intuitivo, y facilita el análisis de diferentes alternativas que se planteen, en relación con un problema determinado.

7.2. FUNCIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN DE BOMBEO ELEMENTAL

Se trata de analizar el comportamiento de una bomba rotodinámica, de características conocidas (curvas H_B vs. Q y η_B vs. Q), cuando se emplea para impulsar un líquido, a través de una instalación simple, desde un depósito de aspiración, precedida por la tubería de aspiración, y seguida de la tubería de impulsión. De estas últimas se conocen su longitud (L), diámetro (D), material, rugosidad (k_s) y los diversos accesorios acoplados en ellas, tales como codos, válvulas, uniones, filtros, etc. Además, se conocen las propiedades

físicas del líquido a impulsar, tales como densidad (ρ), viscosidad cinemática (ν), peso específico (γ), temperatura (T°) y presión de vapor (p_v).

La Figura 7.1 muestra un esquema típico de una instalación simple o elemental de bombeo.

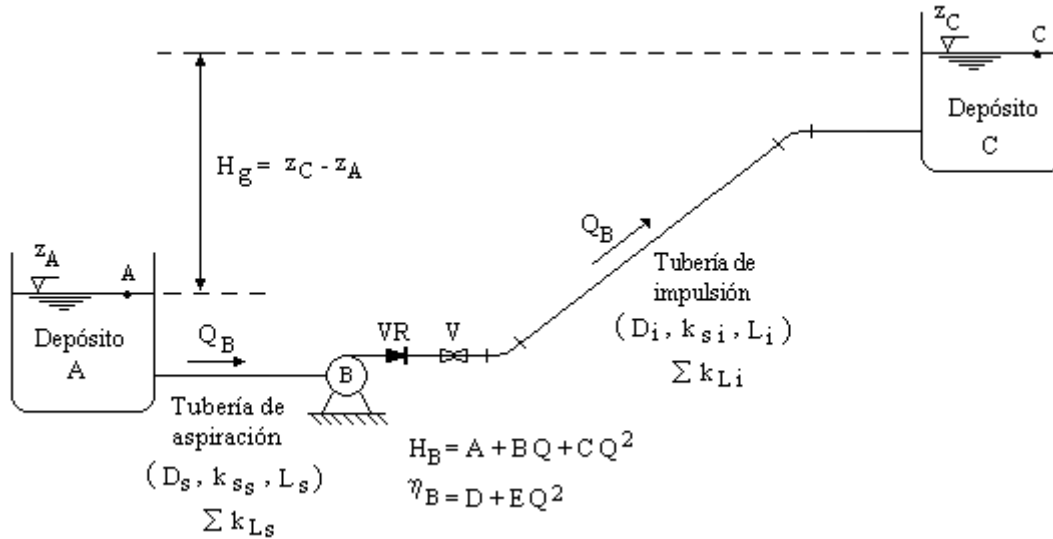


Figura No. 7.1. Esquema de una instalación de bombeo elemental típica.

7.2.1. Resolución Analítica del Punto de Funcionamiento

Partiendo del planteamiento de la ecuación de Bernoulli (ecuación de conservación de la energía), entre los puntos (A) y (C), ubicados en la superficie del líquido en los depósitos de aspiración y de descarga, respectivamente, se tiene:

$$H_A - \Delta H_{A-B} + H_B - \Delta H_{B-C} = H_C \quad (7.1)$$

$$\left(z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{\alpha v_A^2}{2g} \right) - (h_f + \sum h_L)_{A-B} + H_B - (h_f + \sum h_L)_{B-C} = z_C + \frac{p_C}{\gamma} + \frac{\alpha v_C^2}{2g} \quad (7.2)$$

de donde:

$$\underbrace{H_B}_{\text{Altura de la bomba}} = \underbrace{(z_C - z_A)}_{\text{Altura geométrica}} + \underbrace{(h_{f_{A-B}} + h_{f_{B-C}})}_{\text{Pérdidas de carga por fricción}} + \underbrace{(\sum h_{L_{A-B}} + \sum h_{L_{B-C}})}_{\text{Pérdidas de carga locales}} \quad (7.3)$$

La expresión (7.3) es la llamada ecuación de resistencia, cuya representación gráfica es llamada curva resistente del sistema. Véase la Figura 7.2. En ella, H_B es la energía,

expresada en altura, que debe suministrar la bomba, a efectos de impulsar el agua a una tasa Q_B que no se conoce.

Por otra parte, la bomba instalada tiene su correspondiente ecuación característica, generalmente expresada por la siguiente ecuación:

$$H_B = A + B Q_B + C Q_B^2 \quad (7.4)$$

cuya representación gráfica es conocida con el nombre de curva motriz. Véase la Figura 7.2

El desnivel geométrico, $(z_C - z_A)$, es la altura geométrica, H_g , o altura estática, H_{est} , que ha de vencer al sistema de bombeo.

Los restantes términos son las pérdidas de carga por rozamiento y por singularidades, que ocurren a lo largo de las tuberías de aspiración e impulsión.

Las pérdidas de carga por rozamiento se calculan con la ecuación de Darcy & Weisbach:

$$h_f = \frac{8 f L Q_B^2}{\pi^2 g D^5} \quad (7.5)$$

El coeficiente de fricción, f , se calcula por medio de la ecuación de Colebrook & White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7 D} + \frac{2.51}{R \sqrt{f}} \right) \quad (7.6)$$

Eliminando f de las ecuaciones (7.5) y (7.6), se llega a la siguiente ecuación, la cual se llamará, de ahora en adelante, la ecuación de Darcy & Weisbach, combinada con la de Colebrook & White, y se abreviará así: (D&W - C&W):

$$Q_B = -\frac{\pi D^2}{2} \sqrt{2 g D \left(\frac{h_f}{L} \right)} \cdot \log \left(\frac{k_s}{3.7 D} + \frac{2.51 \nu}{D \sqrt{2 g D \left(\frac{h_f}{L} \right)}} \right) \quad (7.7)$$

Las pérdidas de carga localizadas, debidas a válvulas y accesorios, se calcularán con la ecuación de Borda & Carnot:

$$h_L = k_L \frac{v^2}{2g} = \frac{8k_L Q_B^2}{\pi^2 g D^4} \quad (7.8)$$

Por lo cual,

$$\sum h_L = \frac{8 \sum k_L Q_B^2}{\pi^2 g D^4} \quad (7.9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (7.4), (7.5) y (7.9) en la ecuación (7.3), se tiene:

$$\underbrace{(A + B Q_B + C Q_B^2)}_{\text{Curva motriz, } H_m} = \underbrace{\underbrace{(z_C - z_A)}_{\text{Altura estática}} + \left(\frac{8f_s L_s Q_B^2}{\pi^2 g D_s^5} + \frac{8f_i L_i Q_B^2}{\pi^2 g D_i^5} \right)}_{\text{Curva resistente, } H_r} + \left(\frac{8 \sum k_{L_s} Q_B^2}{\pi^2 g D_s^4} + \frac{8 \sum k_{L_i} Q_B^2}{\pi^2 g D_i^4} \right) \quad (7.10)$$

Obsérvese, en la ecuación (7.10), que la resolución del problema de una instalación de bombeo elemental se reduce a resolver la igualdad entre la curva motriz de la bomba instalada, H_m , y la curva resistente de la instalación, H_r . Esto es:

$$H_m = H_r \quad (7.11)$$

La ecuación (7.10) se puede simplificar aún más, a la siguiente expresión:

$$(A + B Q_B + C Q_B^2) = (z_C - z_A) + \frac{8}{\pi^2 g D_s^5} (f_s L_s + D_s \sum k_{L_s}) Q_B^2 + \frac{8}{\pi^2 g D_i^5} (f_i L_i + D_i \sum k_{L_i}) Q_B^2 \quad (7.12)$$

o a la siguiente ecuación:

$$\underbrace{(A + B Q_B + C Q_B^2)}_{\text{Curva motriz, } H_m = f_1(Q_B)} = \underbrace{\left(\frac{1}{D_s^5} (f_s L_s + D_s \sum k_{L_s}) + \frac{1}{D_i^5} (f_i L_i + D_i \sum k_{L_i}) \right)}_{\text{Curva resistente, } H_r = f_2(Q_B)} Q_B^2 \quad (7.13)$$

En la ecuación (7.13), los valores de todas las variables involucradas son conocidos, excepto los de Q_B y f . Este último depende del primero, y ambos se pueden calcular,

resolviendo simultáneamente el sistema de ecuaciones (7.13) y (7.6), junto con la ecuación para el número de Reynolds:

$$\mathbf{R} = \frac{4 Q_B}{\pi D v}$$

Calculando Q_B , se remplazará en la ecuación (7.4) para obtener el valor de H_B , quedando, así, definido el Punto de Funcionamiento, PF (Q_B , H_B).

7.2.2. Resolución Gráfica del Punto de Funcionamiento

Conocidas las ecuaciones de la curva motriz, $H_m = f_1(Q_B)$, y de la curva resistente, $H_r = f_2(Q_B)$.

$$H_m = A + B Q_B + C Q_B^2$$

y

$$H_r = (z_C - z_A) + \frac{8}{\pi^2 g} \left[\frac{1}{D_s^5} (f_s L_s + D_s \sum k_{L_s}) + \frac{1}{D_i^5} (f_i L_i + D_i \sum k_{L_i}) \right] Q_B^2$$

se grafican en un mismo plano cartesiano H vs. Q_B . La intersección de ambas curvas representa el punto de funcionamiento PF (Q_B , H_B) deseado. Véase la Figura 7.2.

Se acostumbra también representar gráficamente, en el mismo plano cartesiano, la curva de η_B vs. Q_B , para determinar la eficiencia de la bomba, correspondiente al punto de funcionamiento.

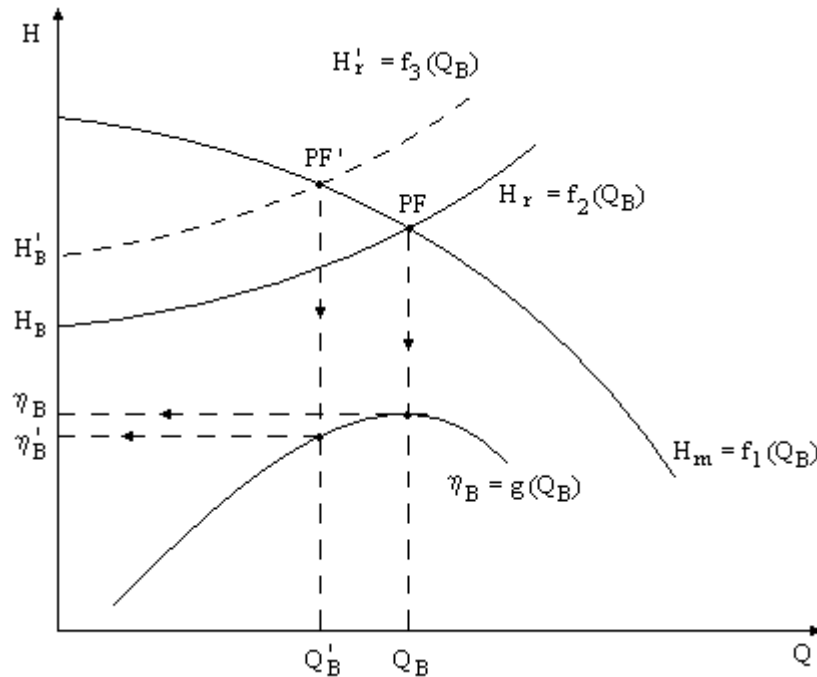


Figura No. 7.2. Determinación gráfica del punto de funcionamiento de una instalación de bombeo elemental.

Obsérvese en la Figura 7.2 cómo se desplaza el punto de funcionamiento PF, en virtud de la nueva curva resistente correspondiente a un cambio en la altura geométrica, H_g , ocasionada, por ejemplo, cuando se produce un descenso en el nivel superficial de agua en el depósito de aspiración.

Esto último es muy frecuente en instalaciones de bombeo de agua subterránea, desde un pozo de abastecimiento.

Es fácil ver en la misma figura, cómo disminuye el rendimiento de la bomba al aumentar la altura estática, H_g .

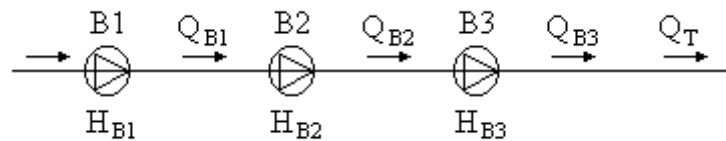
7.3. ACOPLAMIENTO DE BOMBAS ROTODINÁMICAS

El acoplamiento de dos o más bombas puede llevarse a cabo, bien en serie, bien en paralelo, según las necesidades. En serie, la tubería de impulsión de una bomba se constituye en la tubería de aspiración de la siguiente unidad, por lo que el caudal

bombeado, Q_B , es el mismo para todas ellas, y la altura del conjunto es la suma de las alturas desarrolladas por las bombas individualmente. Véase la Figura 7.3.

Cuando se acoplan dos o más bombas en paralelo, cada una de éstas aspira el fluido desde un tanque o depósito común, para reunir sus respectivos caudales impulsados en una tubería de impulsión común para ellas. Ver la Figura 7.4. En este tipo de acoplamiento, el caudal total del acoplamiento es la suma de los caudales individuales, y la altura total es constante e igual a la de cada una de las bombas individualmente.

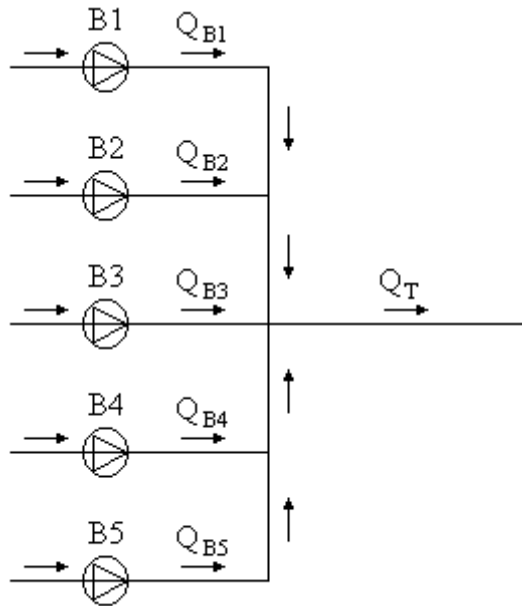
Las dos figuras siguientes resumen los esquemas de acoplamiento de bombas en serie y en paralelo, con sus respectivos comportamientos en cuanto al caudal total y la altura total del conjunto acoplado en bombas.



$$Q_T = Q_{\text{conjunto serie}} = Q_{B1} = Q_{B2} = Q_{B3} = \dots = Q_{Bn}$$

$$H_{BT} = H_{B1} + H_{B2} + H_{B3} + \dots + H_{Bn}$$

Figura No. 7.3. Acoplamiento de bombas en serie.



$$Q_T = Q_{\text{conjunto paralelo}} = Q_{B1} + Q_{B2} + Q_{B3} + \dots + Q_{Bn}$$

$$H_{BT} = H_{B1} = H_{B2} = H_{B3} = \dots = H_{Bn}$$

Figura No. 7.4. Acoplamiento de bombas en paralelo.

7.3.1. Acoplamiento de Bombas en Serie

Este tipo de acoplamiento se emplea en casos en los cuales se desea elevar un mismo caudal a distintas alturas, o para impulsar un determinado caudal, venciendo grandes resistencias debidas a grandes longitudes de las conducciones (líquidos industriales: petróleo, ACPM, gasolina, etc.), si bien es relativamente pequeño el desnivel geométrico a vencer.

Esta manera de optar las bombas es poco frecuente y no debe confundirse con el caso de tener dos o más estaciones de bombeo escalonadas, como por ejemplo, en un sistema de abastecimiento de agua, o en largas conducciones de combustible, en los cuales la descarga de una bomba se recibe en un depósito elevado con respecto al anterior, desde donde aspira la siguiente unidad, para impulsar al fluido hasta el próximo depósito, y, así, sucesivamente. En este último caso los caudales impulsados individualmente no

necesariamente tienen que ser iguales, asimismo, tampoco se requiere que las bombas estén funcionando a la vez.

La situación de acoplamiento de bombas en serie más frecuente la constituye la disposición de N rodetes idénticos en una bomba multietapas (o multicelular). Las bombas multicelulares se aplican cuando se desea bombear caudales a grandes alturas, como, por ejemplo, en bombas de aguas de pozo.

En efecto, si se emplea una bomba de rodete único para impulsar agua desde un pozo hacia una altura relativamente grande, aquella deberá tener un diámetro de rotor grande, y así, también, grande sería la bomba y la tubería de aspiración, por lo cual el diámetro del pozo sería grande (del orden de 1.0, 1.5 m o más). Además, si la bomba opera en aspiración (succión positiva) y el pozo es relativamente profundo (5, 10, 20 50, ... 150 m), la cavitación sería inevitable, y, si a esto se le suma el hecho de que, en épocas de sequía, el nivel del pozo desciende, aumentando la altura de succión y la altura estática, el punto de funcionamiento se desplazaría en la curva motriz de la bomba (H_B vs. Q), por lo cual disminuye el caudal de bombeo, reduciéndose el rendimiento de la misma. Ver la Figura 7.5.

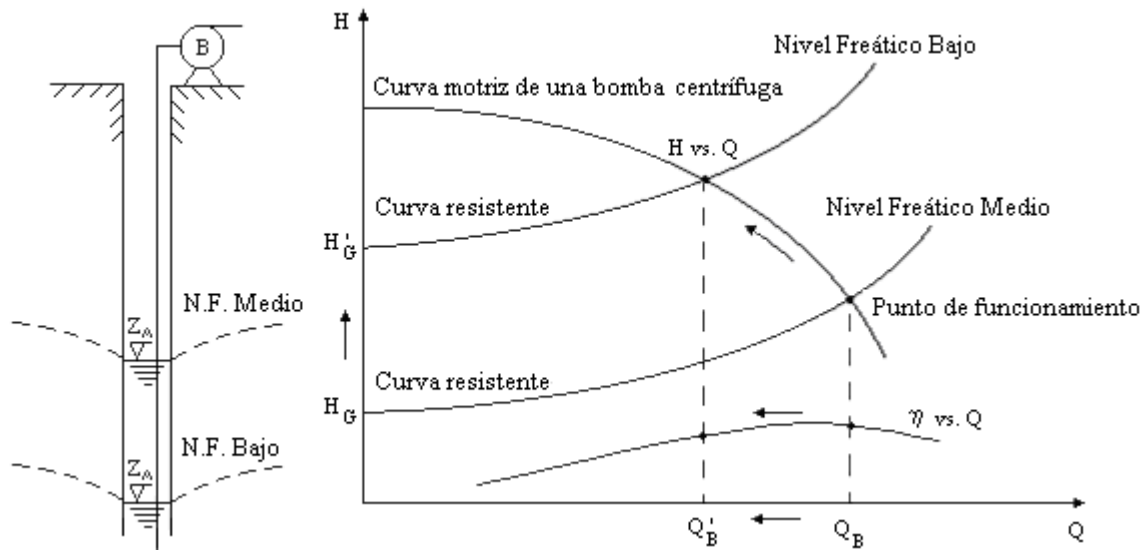


Figura No. 7.5. Curva motriz de una bomba centrífuga frente a la curva resistente de la instalación, para diferentes alturas estáticas.

En contra de lo anterior, las bombas multicelulares ofrecen un número específico de revoluciones, n_s , elevado, con respecto al caso de una bomba de un solo impulsor, lo que se traduce en mayor rendimiento. En efecto, $\eta \propto n_s$.

Para una bomba de un solo rotor, en el punto óptimo de funcionamiento, P.O.F.

$$n_s = n_0 \frac{\sqrt{Q_0}}{H_{B0}^{3/4}}$$

Para una bomba multietapas de N rodetes iguales, e iguales al de la bomba anterior, también, en su P.O.F.:

$$H_{B1 \text{ rodete}} = \frac{H_{B0 \text{ conj}}}{N}$$

$$n'_s = n_0 \frac{\sqrt{Q_0}}{\left(\frac{H_{B0}}{N}\right)^{3/4}} = n_0 \frac{\sqrt{Q_0}}{H_{B0}^{3/4}} N^{3/4}$$

$$\text{Luego, } n'_s = N^{3/4} \cdot n_s$$

Como se puede ver, $n'_{s \text{ conjunto en serie}} > n_{s1 \text{ bomba}}$

La curva característica H vs. Q de bombas o rodetes en serie se obtiene a partir de las correspondientes curvas H vs. Q de las bombas o rodetes que conformen el conjunto acoplado de bombas, sumando las alturas H_{Bi} , para igualdad de caudales. Ello se traduce en que la curva H vs. Q resultante tendrá una pendiente acusada, mucho mayor que las de las curvas individuales. Véase la Figura 7.6.

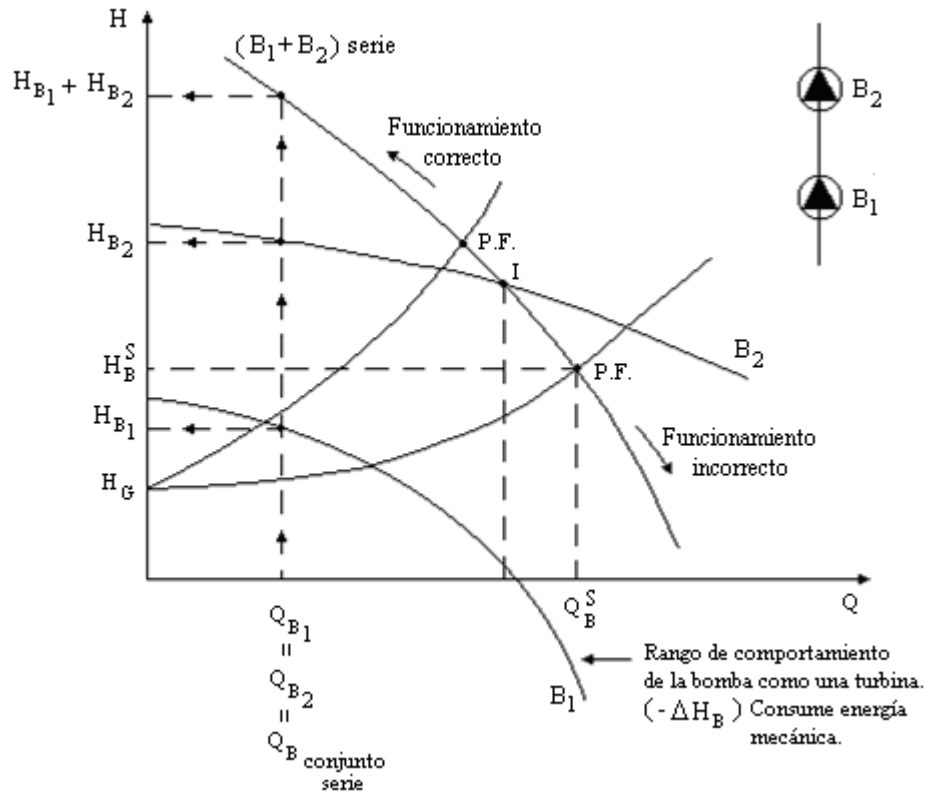


Figura No. 7.6. Curva característica H vs. Q de dos bombas diferentes en serie.

En la figura anterior se tienen dos bombas de características diferentes, conectadas en serie. Ello tiene el inconveniente de que, si el punto de funcionamiento del sistema (punto de intersección entre la curva motriz del acoplamiento serie $(B_1 + B_2)$ con la curva resistente del sistema queda por debajo del punto I, la operación es incorrecta, puesto que el caudal Q_B^S y la altura H_B^S (el superíndice “s” significa acoplamiento en serie) del acoplamiento serían menores o iguales que los correspondientes a la bomba mayor B_2 .

Además, en estos casos, resulta muy difícil conseguir que todas las bombas trabajen con eficiencias elevadas. Esto, sumado a lo anterior, desmotiva el uso de dos o más (n) bombas diferentes en serie.

La eficiencia global del conjunto de bombas en serie se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta_T = \frac{P_{uT}}{\sum_{i=1}^N P_{ai}} = \frac{\gamma \cdot Q_t \cdot H_T}{\sum_{i=1}^N P_{ai}}$$

Un caso particular de uso más generalizado, como se dijo anteriormente, es el de las bombas multicelulares o multietapas, en donde los rodetes acoplados son iguales, y cuyas curvas características H vs. Q y η vs. Q son también idénticas entre sí. En este caso desaparece el problema de rangos indeseados de funcionamiento u operación incorrecta. Véase la Figura 7.7.

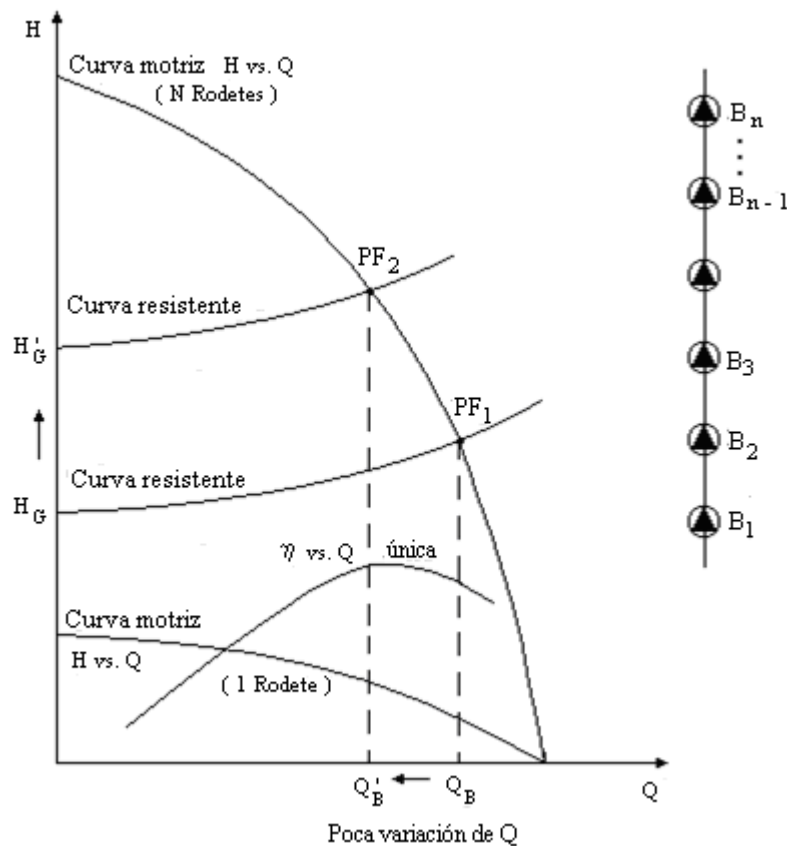


Figura No. 7.7. Curva característica H vs. Q de bombas multietapas.

Matemáticamente, el paso de las curvas características de un impulsor a la del conjunto de N impulsores iguales, acoplados en serie, es inmediato, así:

Si, para una etapa o rodete, las curvas características, H vs. Q y η vs. Q, son:

$$H_B = A + BQ + CQ^2 \quad ; \quad \eta_B = DQ + CQ^2$$

para N etapas iguales (o conjunto) se tiene:

$$H_B^s = N(A + BQ + CQ^2) \quad ; \quad \eta_B^s = DQ + CQ^2$$

Cuando una bomba multietapas como ésta se emplea en el bombeo de agua desde un pozo, la elevada pendiente de la curva motriz resultante hace que las variaciones estacionales importantes del nivel del agua en el pozo (lo cual hace que la altura estática, H_G , varíe apreciablemente) produzcan pequeñas fluctuaciones del caudal impulsado por la bomba, y de su eficiencia.

Conviene advertir que la asociación de bombas en serie no es aconsejable en la inyección directa a redes de distribución de agua, dado que una ligera variación en el caudal demandado (inyectado) genera una gran variación en la altura de presión, (p/γ) , proporcionada por el sistema de bombeo, causando daños por sobrepresión.

Por último, a efectos de evitar las altas presiones a caudales bajos, es aconsejable arrancar el sistema de bombas en serie con la válvula de descarga total o casi totalmente abierta.

7.3.2. Acoplamiento de Bombas en Paralelo

Cuando se trata de satisfacer las necesidades o demandas de agua, variables en el tiempo, como en sistemas de riego, o en redes de distribución de agua potable, se justifica el acoplamiento de dos o más bombas en paralelo.

En efecto, el empleo de una sola bomba, para satisfacer los consumos altamente variables con el tiempo, sería factible también, pero antieconómico, puesto que aquella tendría que trabajar con eficiencias muy bajas, correspondientes a los distintos puntos de funcionamiento, dado que las curvas de η vs. Q no son, infortunadamente, planas.

Por el contrario, el suministro de agua, variable según la demanda, puede garantizarse por medio de una progresiva entrada en funcionamiento de distintos grupos de bombas, conformado por bombas acopladas en paralelo, manteniendo el rendimiento del conjunto dentro de unos valores aceptables.

Para obtener la curva característica de un conjunto de bombas acopladas en paralelo, basta con sumar sus respectivos caudales, para una misma altura o cabeza, a partir de sus correspondientes curvas características de H vs. Q. Ello resulta en unas curvas globales H vs. Q, cada vez más planas, tanto más planas cuanto más bombas en paralelo sean acopladas. Véase la Figura 7.8.

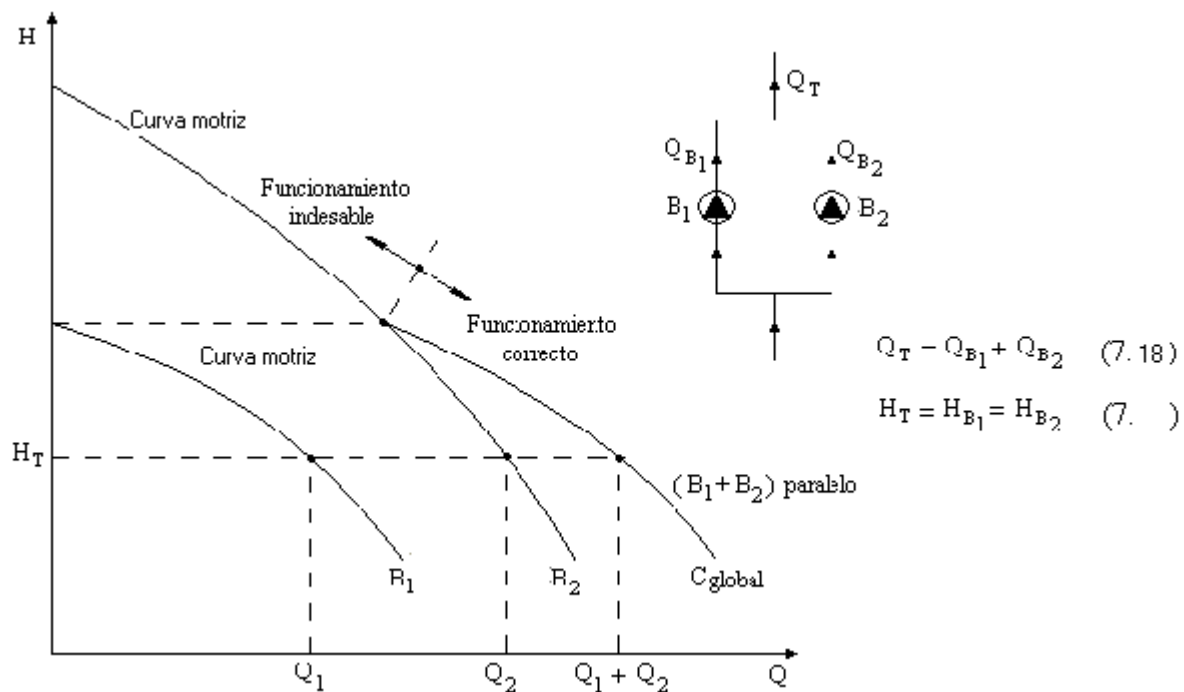


Figura No. 7.8. Acoplamiento de dos bombas diferentes acopladas en paralelo.

El tratamiento analítico de bombas acopladas en paralelo es más laborioso, sobre todo si éstas son distintas. En efecto, si se acoplan N bombas idénticas en paralelo, las curvas características H vs. Q y η vs. Q, resultantes del acoplamiento, se obtienen de la siguiente manera:

$$H = A + B \left(\frac{Q}{N} \right) + C \left(\frac{Q}{N} \right)^2 \quad (7.16)$$

$$y \quad \eta = D \left(\frac{Q}{N} \right) + E \left(\frac{Q}{N} \right)^2 \quad (7.17)$$

Ahora, si las N bombas son diferentes, cuyas curvas características son:

$$H_{B1} = A_1 + B_1 Q_1 + C_1 Q_1^2 \quad (7.18) \quad \eta_{B1} = D_1 Q_1 + E_1 Q_1^2 \quad (7.19)$$

$$H_{B2} = A_2 + B_2 Q_2 + C_2 Q_2^2 \quad (7.20) \quad \eta_{B2} = D_2 Q_2 + E_2 Q_2^2 \quad (7.21)$$

⋮

⋮

$$H_{BN} = A_N + B_N Q_N + C_N Q_N^2 \quad (7.22) \quad \eta_{BN} = D_N Q_N + E_N Q_N^2 \quad (7.23)$$

la altura total del conjunto de bombas, $H_{T \text{ paralelo}} = H_{B1} = H_{B2} = \dots = H_{BN}$, se obtendrá despejando primero los caudales de las respectivas ecuaciones H_B vs. Q , así:

$$Q_1 = f_1(H_{B1}) ; Q_2 = f_2(H_{B2}) ; Q_3 = f_3(H_{B3}) \dots ; \dots ; Q_N = f_N(H_{BN}) \quad (7.24)$$

$$O, \text{ en general, } Q_i = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C(A - H_{Bi})}}{2C} \quad (7.25)$$

para sustituirlos, después, en la ecuación de balance de masa siguiente:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_N \quad (7.26)$$

o sea:

$$Q_T = f_1(H_{B1}) + f_2(H_{B2}) + f_3(H_{B3}) + \dots + f_N(H_{BN}) \quad (7.28)$$

El tratamiento analítico de las eficiencias requiere el cálculo previo del punto de funcionamiento de cada bomba, individualmente, empleando sus respectivas curvas:

Supóngase, ahora, que se tienen dos bombas que se han de instalar acopladas en paralelo, descargando a una misma línea de impulsión simple. Supóngase, también, que, a la salida de cada bomba, existe una válvula de retención o antirretorno.

Así las cosas, pueden presentarse tres casos:

CASO No. 1: Las dos bombas son idénticas

En la Figura 7.9 se muestran las curvas H vs. Q de la bomba, C_1 , y del conjunto acoplado de bombas, C_{global} , junto con la curva resistente, $C_{resistente}$. Obsérvese que el punto de funcionamiento ha pasado del punto P_1 , correspondiente a una bomba, individualmente, al punto P_2 , correspondiente al conjunto acoplado.

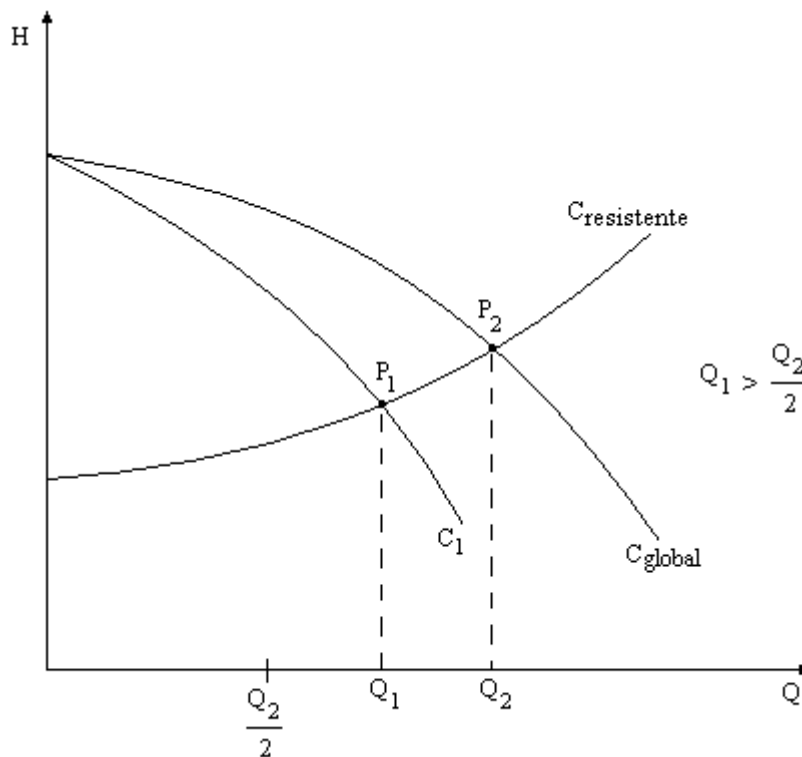


Figura No. 7.9. Acoplamiento de dos bombas idénticas en paralelo.

Exceptuando una curva resistente horizontal (además, sin pérdida de carga en la impulsión), siempre se verificará que $\frac{Q_2}{2} < Q_1$, es decir, $Q_2 < 2Q_1$, lo cual significa que el caudal total

impulsado por las dos bombas acopladas en paralelo es, casi siempre, menor que el doble del caudal que aportaría una sola bomba en la misma instalación.

CASO No. 2: Las dos bombas tienen curvas características H vs. Q distintas, pero igual altura a válvula cerrada ($H_{B1} = H_{B2}$, para $Q = 0$)

En este caso, el problema se resuelve del mismo modo que en el caso No. 1, y la curva característica del conjunto acoplado de bombas se obtiene sumando caudales correspondientes a iguales alturas suministradas por las dos bombas. Nuevamente, en este caso, el caudal total impulsado por el conjunto es menor que la suma de los caudales que respectivamente impulsarían las dos bombas, consideradas individualmente instaladas en el sistema.

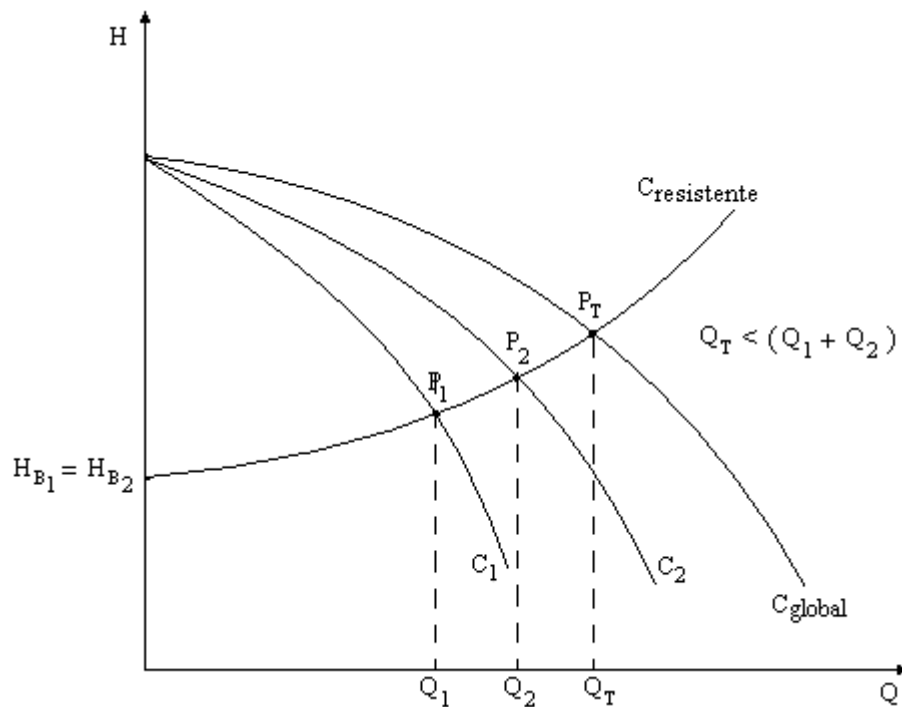


Figura No. 7.10. Acoplamiento de dos bombas distintas en paralelo, con igual ordenada H, para $Q = 0$.

CASO No. 3: Las dos bombas presentan curvas características absolutamente distintas

En este caso, a diferencia de los dos anteriores, la curva resultante presenta una porción común (tramo 2) con la curva de la bomba de mayor altura H , a válvula cerrada ($Q = 0$), como se muestra en la Figura 7.11. En dicho tramo, bajo ninguna circunstancia, se permitiría trabajar el conjunto acoplado, puesto que la bomba B_1 no puede operar en dicha zona y, en consecuencia, el acoplamiento en paralelo no tendría objeto. Ello es una razón poderosa para que, en la práctica, los acoplamientos de bombas en paralelo se haga con bombas idénticas.

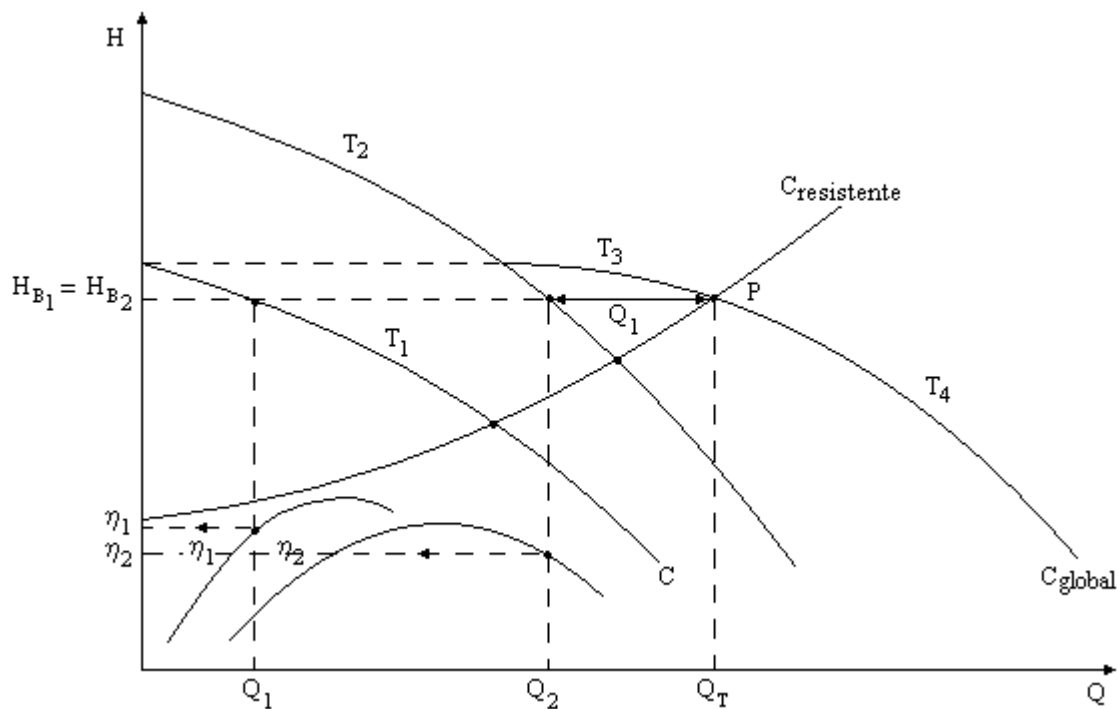


Figura No. 7.11. Curvas características de dos bombas distintas acopladas en paralelo.

Como puede observarse en la Figura 7.11, el tramo T_4 se constituye en la zona de funcionamiento correcto del conjunto acoplado de bombas en paralelo.

Nuevamente, se reitera que el análisis matemático de eficiencias y potencias de cada una de las bombas del grupo requiere del desglose del caudal total en los caudales parciales, Q_i , en función de las correspondientes alturas H_{Bi} . Una vez conocido el punto de funcionamiento del sistema, P , y los caudales individuales, Q_1 y Q_2 , se recurre a las curvas de eficiencia y

de potencia correspondientes a cada bomba. En la Figura 7.11 se indica la manera de determinar las respectivas eficiencias de las bombas. Para las potencias se procedería de manera análoga.

Finalmente, la eficiencia global del conjunto de bombas en paralelo se calcula, también, de

la siguiente manera:

$$\eta_T = \frac{P_{uT}}{\sum_{i=1}^N P_{ai}}$$