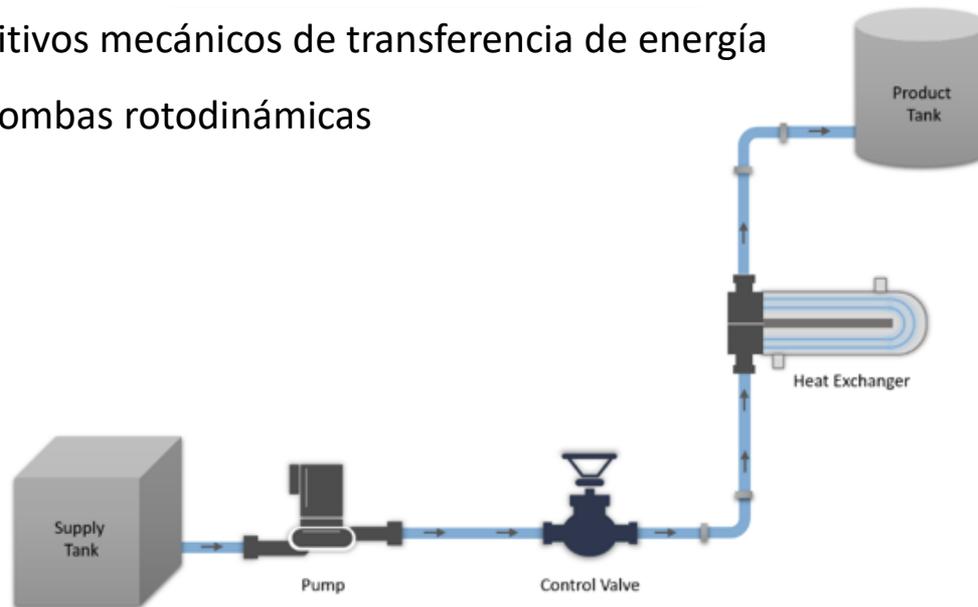


Operaciones Unitarias 1

Elementos para el transporte de fluidos

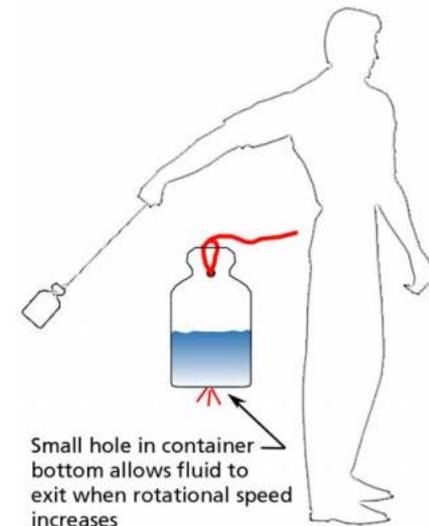
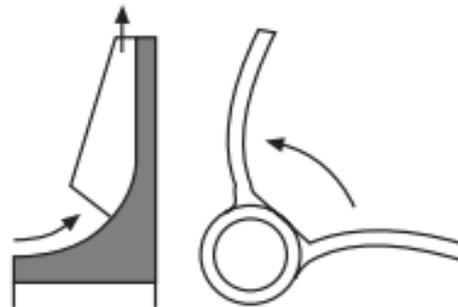
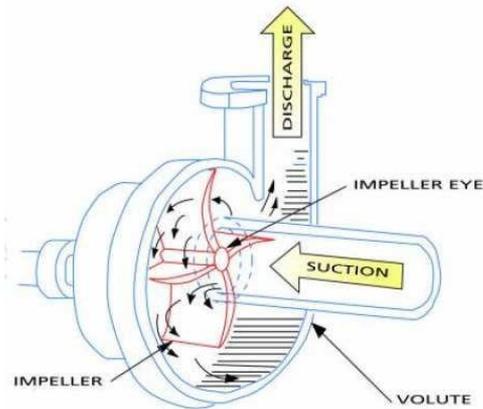
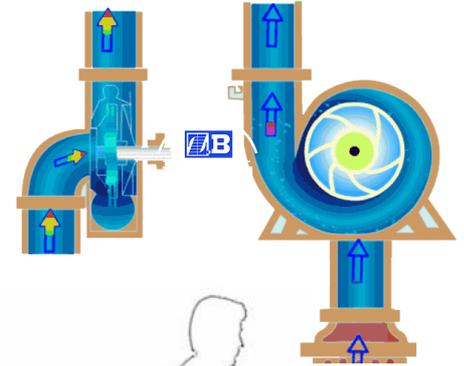
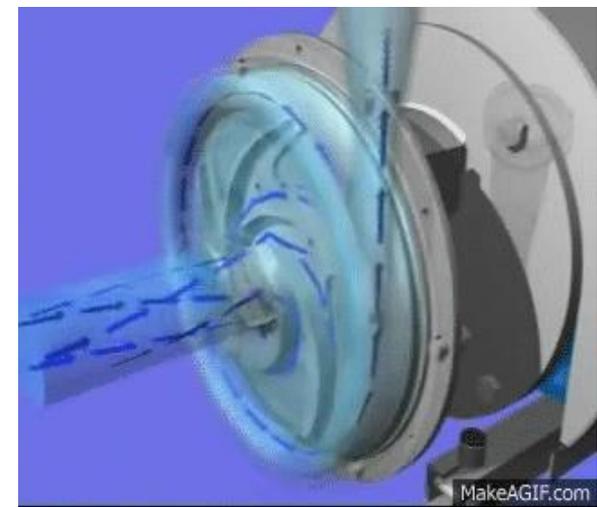
➤ Dispositivos mecánicos de transferencia de energía

❖ Bombas rotodinámicas



Bombas Rotodinámicas: centrífuga, principio de funcionamiento

La energía se imparte al fluido por medio de un disco, provisto de aspas radiales con diversos diseños, llamado **impulsor o rotor**, que gira sobre un eje. El fluido ingresa en una conexión de succión concéntrica a este eje. Fluye hacia fuera por el interior de los espacios que existen entre las aspas y deja el impulsor a una velocidad mayor. El impulsor imparte energía cinética al fluido debido a su forma y alta velocidad de rotación. Al salir del perímetro del impulsor es contenido en una **carcasa (casing)** (también con diferentes diseños) y sale de la bomba a través de una conexión tangencial de descarga. **En la carcasa, la carga de velocidad del fluido procedente del impulsor se convierte en carga de presión.** La diferencia de carga entre la entrada y la salida, o la carga total producida por la bomba, es proporcional a la velocidad y el diámetro del impulsor. Para obtener una carga mayor, se debe aumentar la velocidad de rotación o el diámetro del impulsor.



Bombas Rotodinámicas: centrífuga, elementos: impulsor y carcasa

Tipos de Impulsor (*impeller*) : cerrados, semiabiertos, abiertos

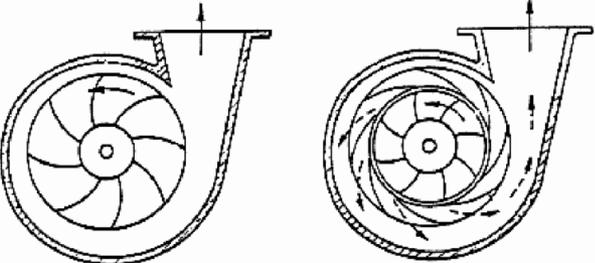
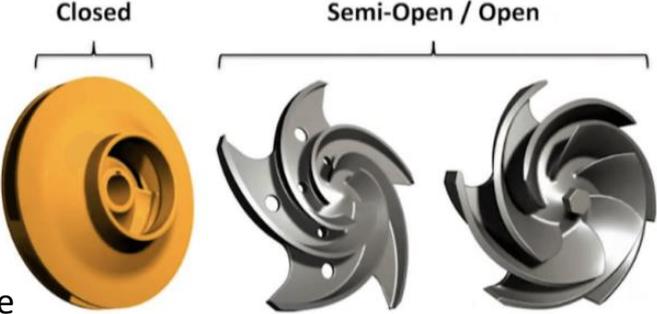
Tipos de Carcasa (*casing*)

Carcasa circular encierra el impulsor con cierto espacio libre. Hay un solo punto de descarga. Es el menos eficiente de los tres tipos.

Voluta presenta un radio de carcasa creciente en la dirección del punto de descarga. La forma y el incremento del radio por grado se eligen para minimizar las pérdidas por irreversibilidad.

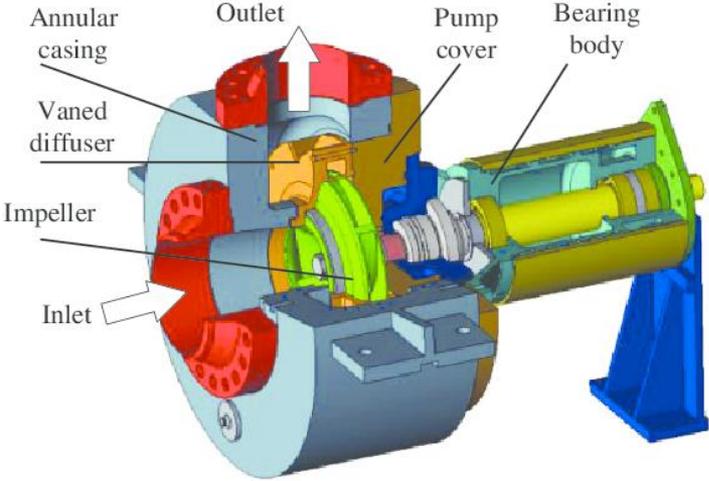
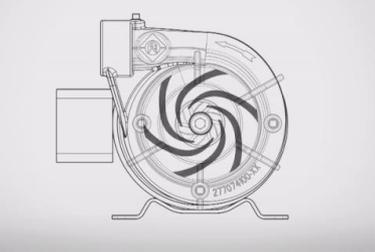
Difusor agrega paletas guías estacionarias que rodean las puntas del impulsor. Estas paletas guías dirigen suavemente el flujo a la descarga. La bomba tipo difusor es la más eficiente.

Types of Impellers



Centrifugal Pump with Volute

Centrifugal Pump with Vaned Diffuser Ring



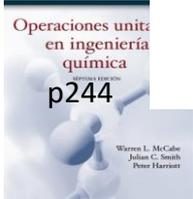
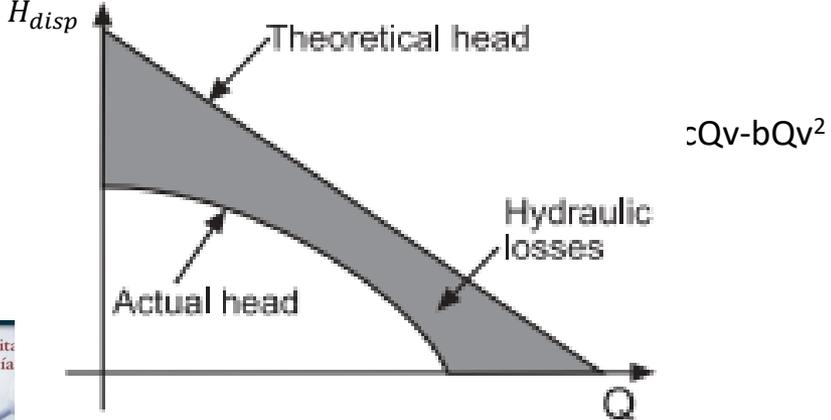
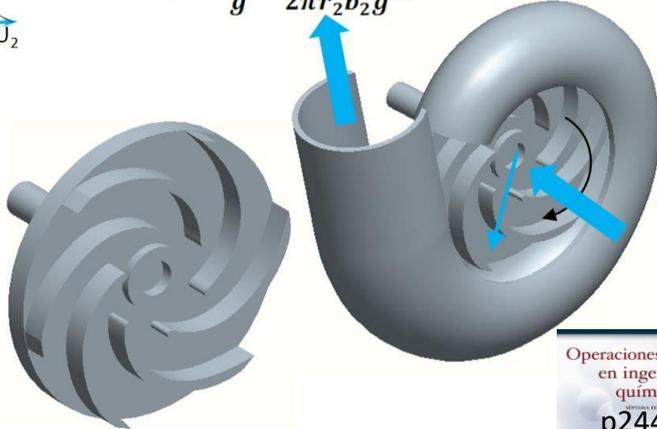
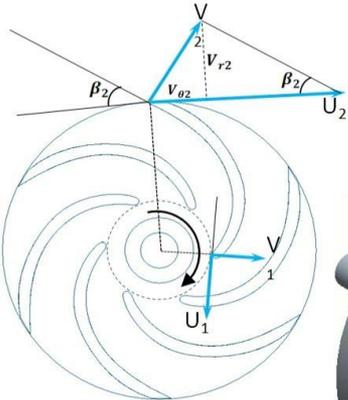
La bomba es accionada mediante conexión a un motor de velocidad constante, comúnmente del orden de 1750 o 3450 rpm o modificable, si cuenta con un sistema de variación de frecuencia.

Bombas Rotodinámicas: curva característica inherente o de performance

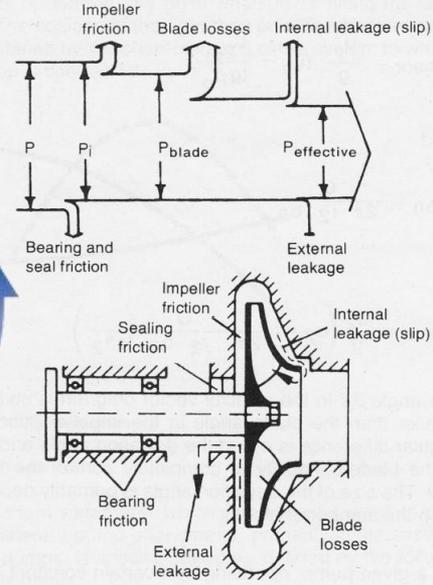
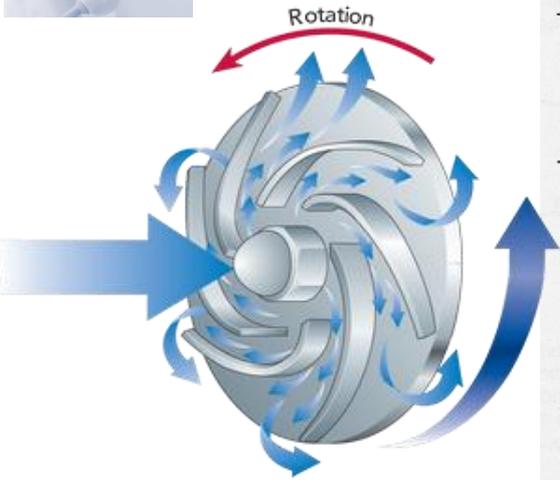
PRESSURE RISE EQUATION

$$h = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2 \cot \beta_2}{2\pi r_2 b_2 g} Q$$

Carga teórica: comportamiento lineal con el caudal



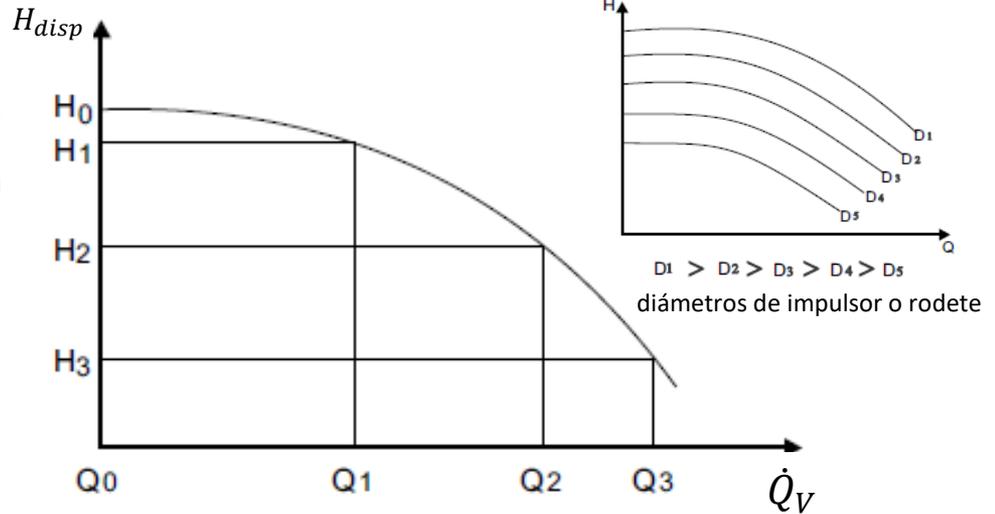
La energía transferida al fluido por unidad de masa que escurre disminuye con el aumento del flujo a través de la bomba. Los $J \cdot kg^{-1}$ máximos está en un flujo cercano al cierre (*shutoff*). A medida que \dot{Q}_V aumenta, también disminuye la energía transferida debido a ineficiencias internas dentro de la bomba. La bomba está diseñada para maximizar su eficiencia a un determinado caudal fijo.



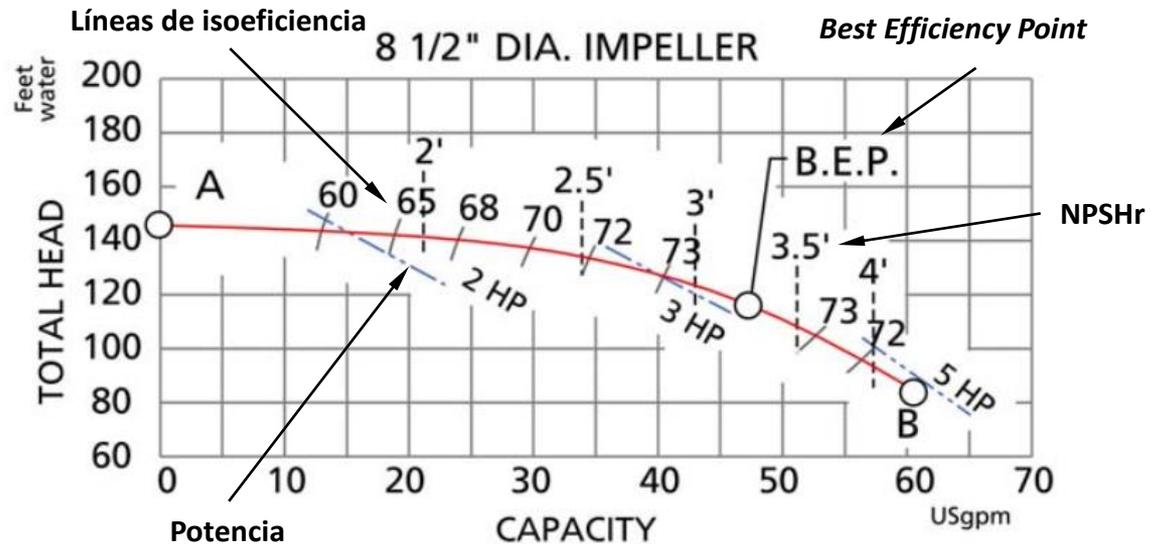
Bombas Rotodinámicas: curva característica inherente o de performance; curva e información complementaria

La curva característica inherente o curva de carga neta disponible o de rendimiento o de performance **depende del diseño de la bomba** y es determinada por el proveedor de la misma.

Una curva de performance está asociado a un diámetro de impulsor definido y a una velocidad de rotación especificada (rpm)

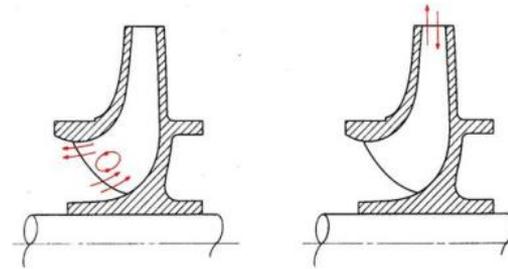
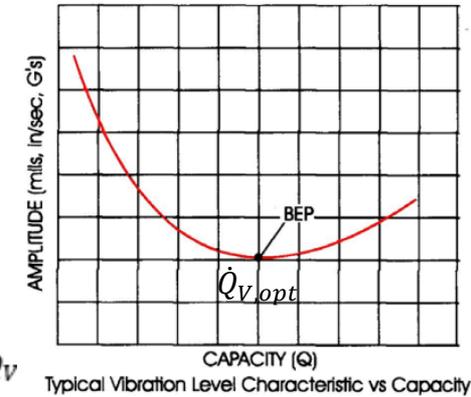
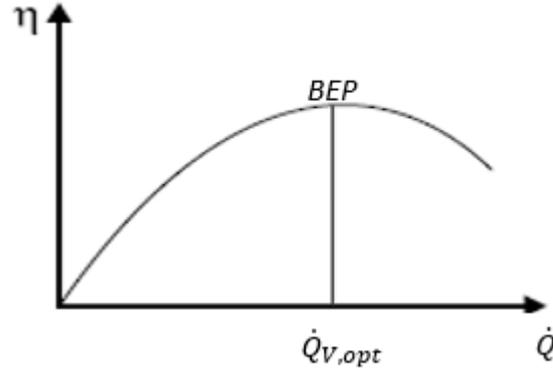


información complementaria



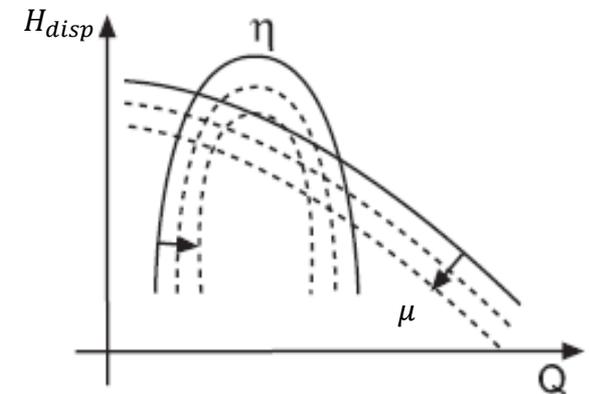
Bombas Rotodinámicas: curva característica inherente o de performance; curva e información complementaria

Curva de eficiencia, η : representa la eficiencia de una bomba en todo su rango de operación. El BEP (*Best Efficiency Point*) es el máximo de la curva de eficiencia. Todos los puntos a la derecha o izquierda del BEP tienen una eficiencia menor. El impulsor está sujeto a fuerzas axiales y radiales, que aumentan cuanto más lejos está el punto de operación del BEP. Estas fuerzas se manifiestan como vibración dependiendo de la velocidad y la construcción de la bomba. En el impulsor también se presentan fenómenos de recirculación que incrementan su irreversibilidad, disminuyendo η



Recirculación interna en impulsor a caudales menores a $\dot{Q}_{v,opt}$

Las curvas de performance se basan en datos generados utilizando agua como fluido (curvas de rendimiento del agua). El uso de estas curvas para fluidos con una viscosidad diferente a la del agua puede llevar a error si no se aplican los factores de corrección adecuados. Estos factores de corrección se aplican a la carga, el caudal y la eficiencia de la bomba



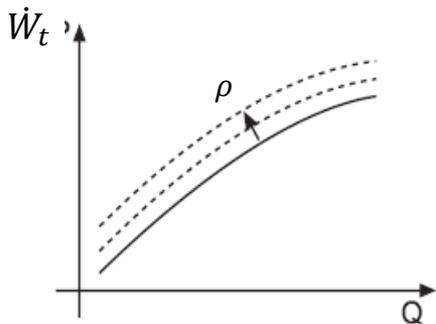
Efecto de la viscosidad μ sobre la carga

Bombas Rotodinámicas: curva característica inherente o de performance; curva e información complementaria

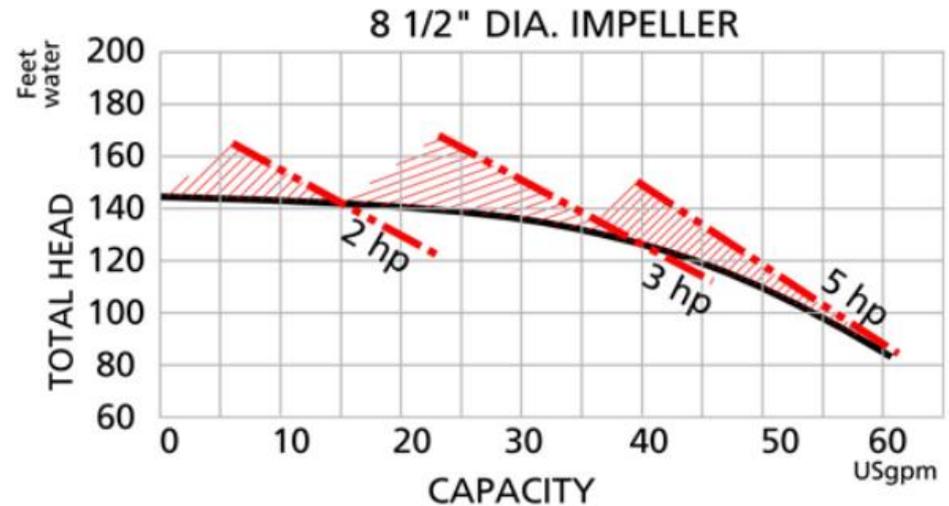
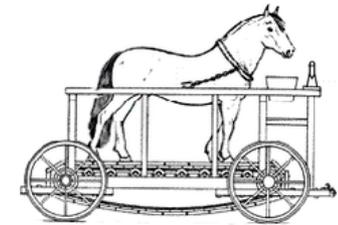
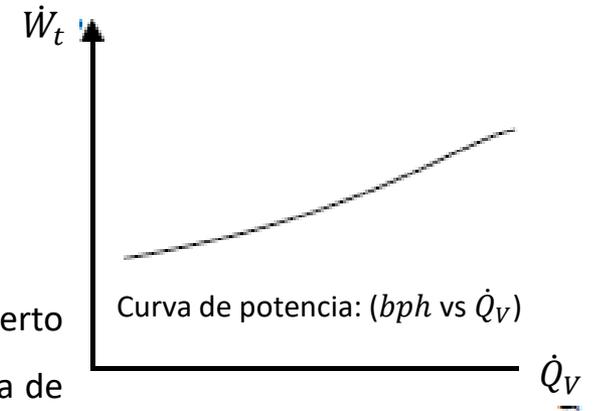
La potencia externa que se proporciona a la bomba (usualmente por un motor eléctrico) se denomina potencia de freno, potencia de accionamiento (*bph: breake horsepower* cuando la potencia está expresada en HP; poco usado).

Las curvas \dot{W}_t dan la potencia requerida para operar la bomba dentro de un cierto rango. Por ejemplo, todos los puntos en la curva de performance a la izquierda de la curva de 2 hp serán alcanzables con un motor de 2 hp. Todos los puntos a la izquierda de la curva de 3 hp y a la derecha de la curva de 2 hp serán alcanzables con un motor de 3 hp. La potencia necesaria del sistema de transporte se puede calcular con $H_{s,op}$, el flujo $\dot{Q}_{V,op}$; debe ser comparada con la potencia requerida de la bomba, teniendo en cuenta su eficiencia.

$$\dot{W}_{s,op} = \dot{m}gH_s = \rho\dot{Q}_{V,op}gH_s \text{ (kW)} \quad \dot{W}_{t,op} = \frac{\dot{W}_{s,op}}{\eta}$$

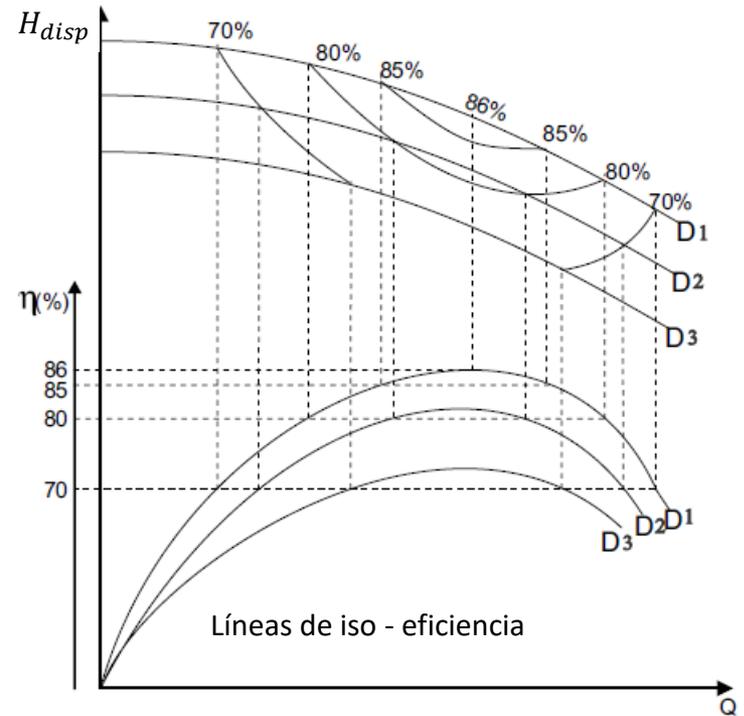


Efecto de la densidad ρ sobre la Potencia

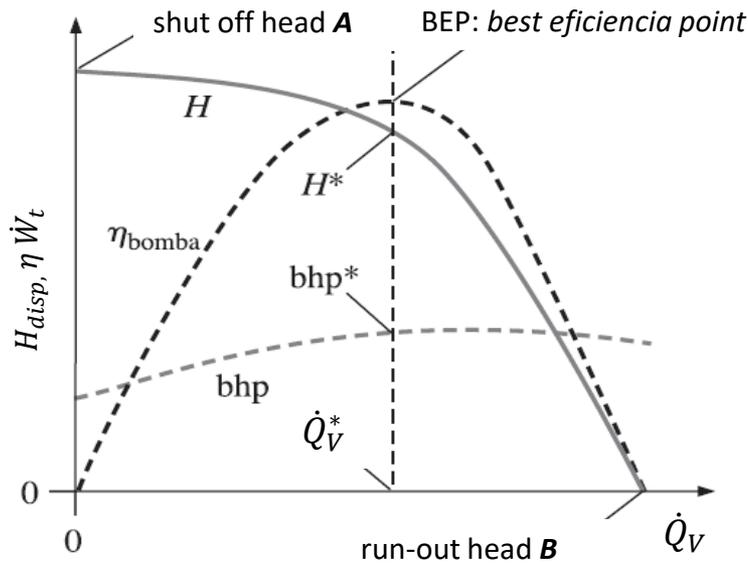


Bombas Rotodinámicas: curva característica inherente o de performance; curva e información complementaria

Líneas de eficiencia ISO: son curvas concéntricamente elípticas que indican la misma eficiencia. Se utilizan para representar cómo cambian los niveles de eficiencia a lo largo de una curva de la bomba a medida que se aleja de la BEP o si se reduce el diámetro del impulsor.



carga neta disponible vs caudal



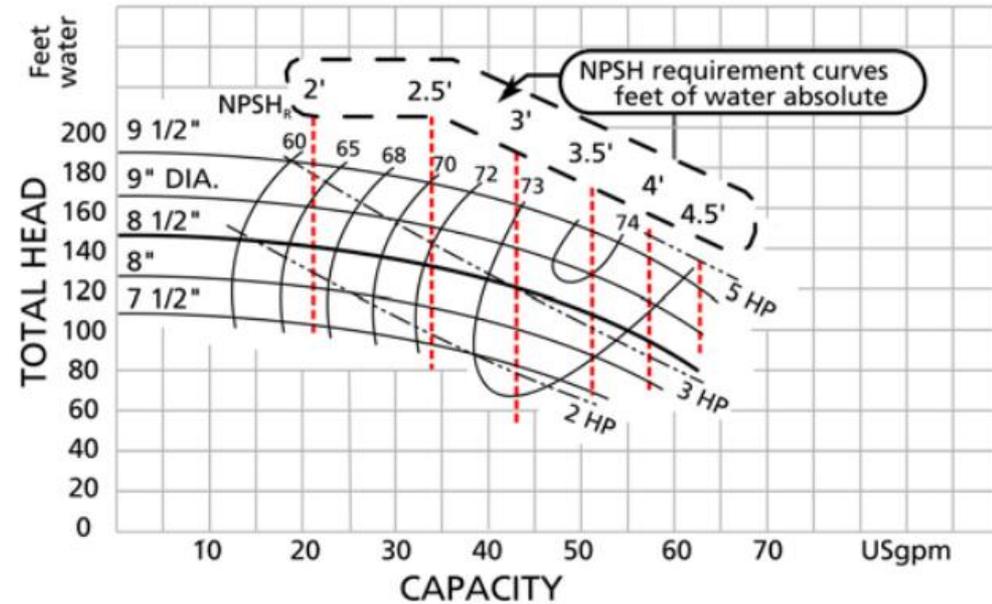
* Carga, caudal y potencia al eje de mayor eficiencia

Tener en cuenta: La carga a flujo cero es la carga *shut-off* (*A*). A partir de allí la carga disminuye hasta alcanzar un mínimo en el punto *run-out* (*B*) que corresponde al flujo máximo de la bomba. Más allá de esto, la bomba no puede funcionar. El rango de operación de la bomba es del punto *A* al *B*.

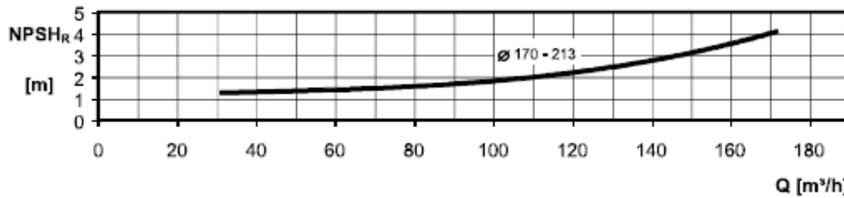
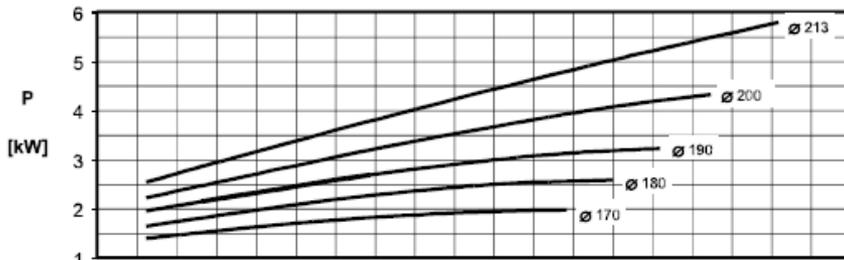
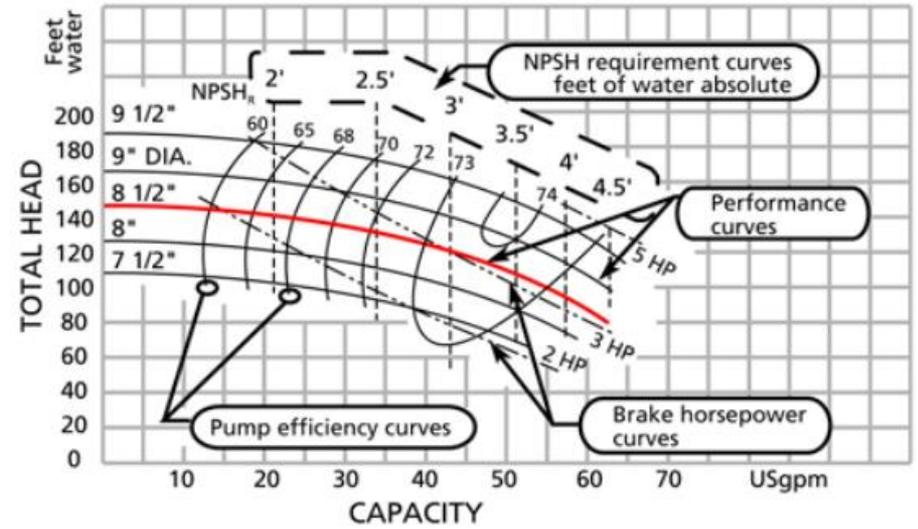
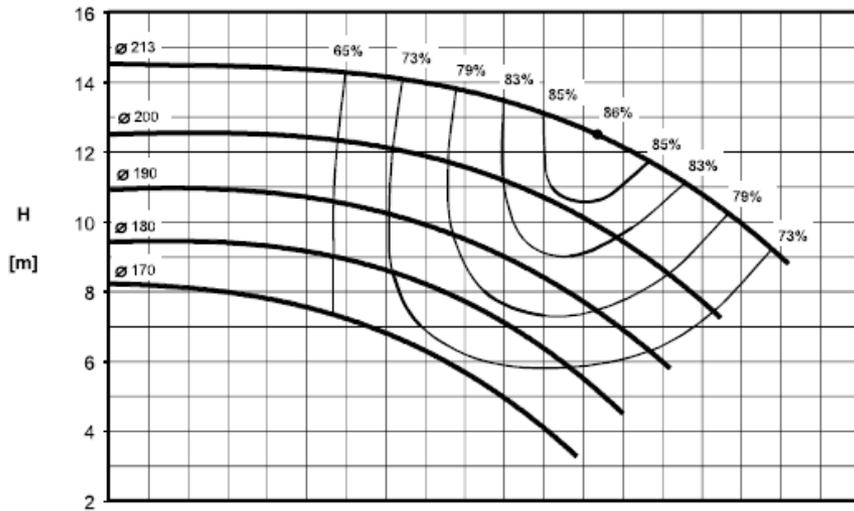
Bombas Rotodinámicas: curva característica inherente o de performance; curva e información complementaria

NPSHr

El fabricante de la bomba especifica un requisito mínimo en el NPSH para que la bomba funcione a su capacidad de diseño. Estas son las líneas discontinuas verticales de la figura. El NPSHr es mayor a medida que aumenta el flujo y más bajo a medida que disminuye el flujo. Esto significa esencialmente que se requiere más carga en la succión de la bomba para flujos altos que bajos. El NPSHr es un término de carga y, por lo tanto, independiente de la densidad del fluido y está en la altura absoluta de la columna de fluido.

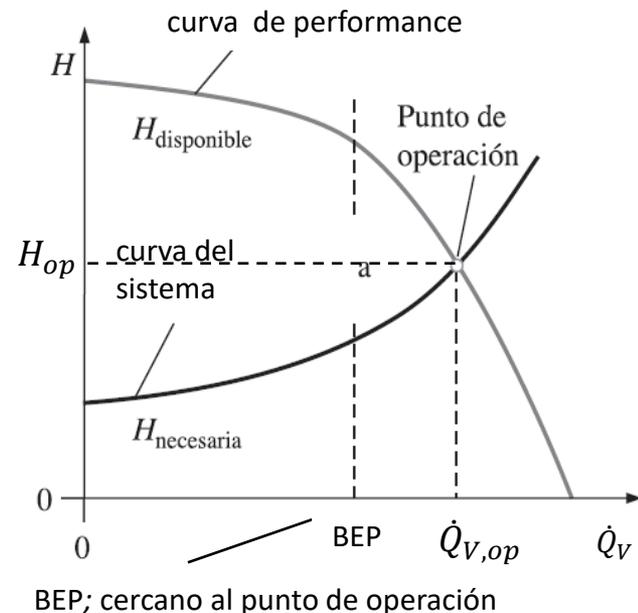


Bombas Rotodinámicas: curva característica inherente o de performance; curva e información complementaria

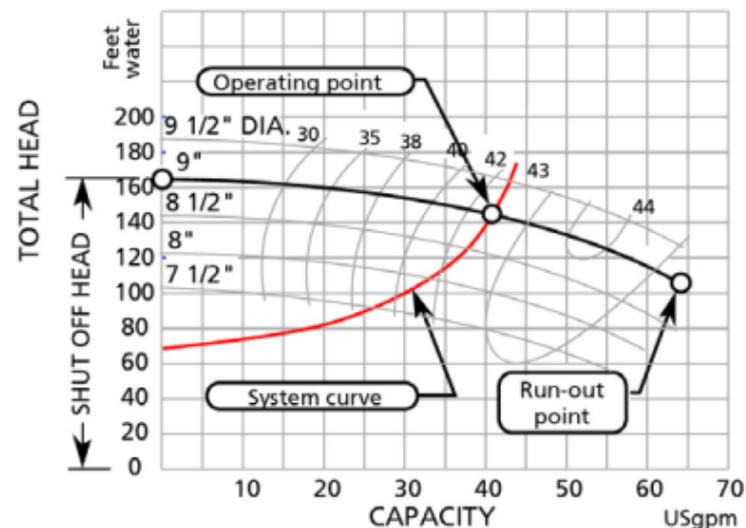
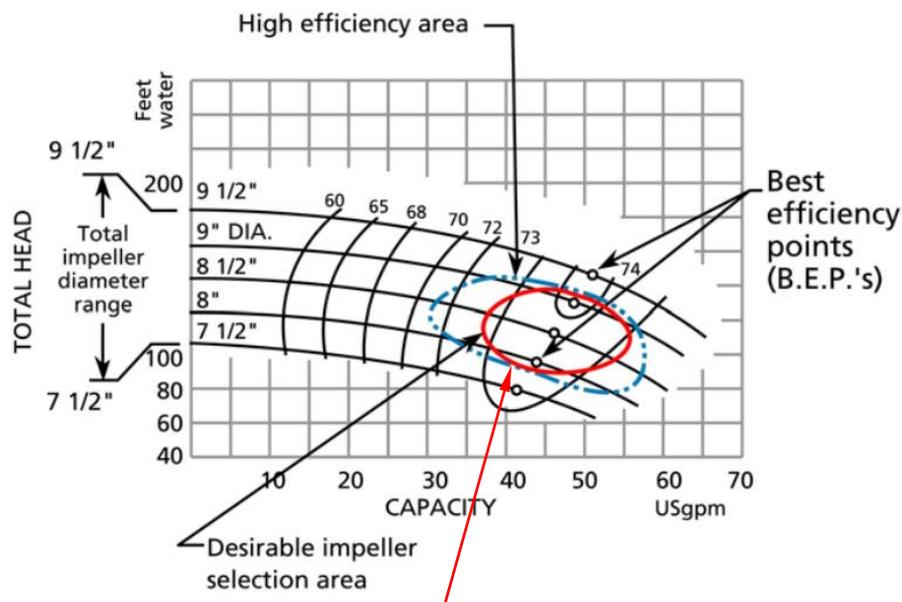


Bombas Rotodinámicas punto de operación

Las dos curvas (performance y del sistema) se encontrarán en un punto común. En este punto, la energía transferida al fluido por la bomba por unidad de masa (H_{disp}) es exactamente igual a la energía necesaria por unidad de masa (H_s) para generar flujo y transportar el fluido dentro del sistema particular. El sistema de bombeo operará en este punto ($\dot{Q}_{V,op}, H_{op} = H_{disp} = H_s$) y no en otro. Si se enciende la bomba, se establecerá automáticamente en el caudal y la carga total asociados con este punto.



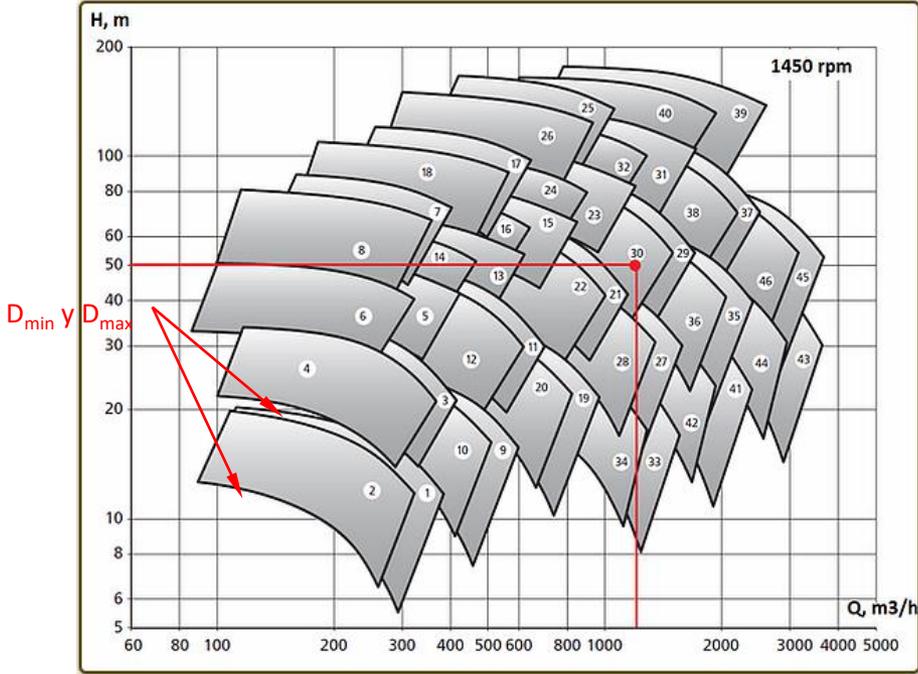
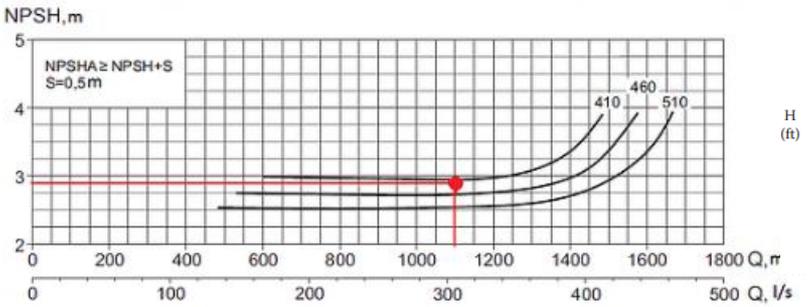
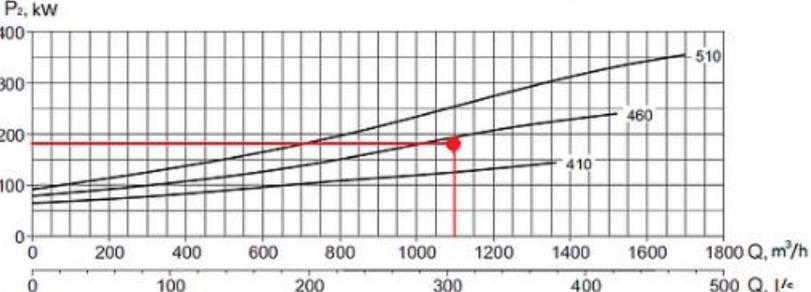
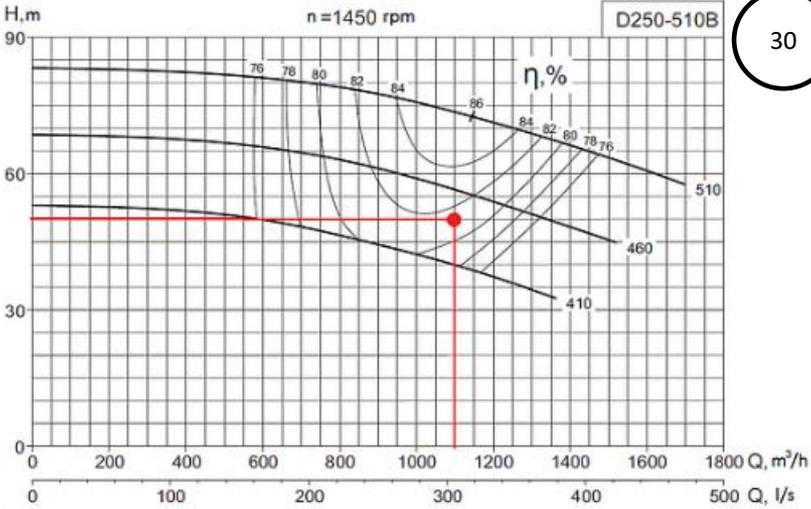
En el punto de operación queda definido: \dot{Q}_V ; H ; \dot{W}_t ; η ; $NSPH_r$



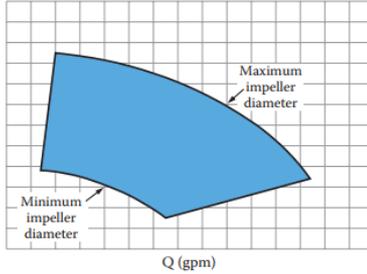
Un requerimiento de diseño o de especificación es que el punto de operación se encuentre cercano al BEP

Bombas Rotodinámicas, selección y dimensionamiento, análisis de la gama hidráulica o diagrama de cobertura

30



En el interior de cada campo el impulsor está reducido a $D < D_{max}$

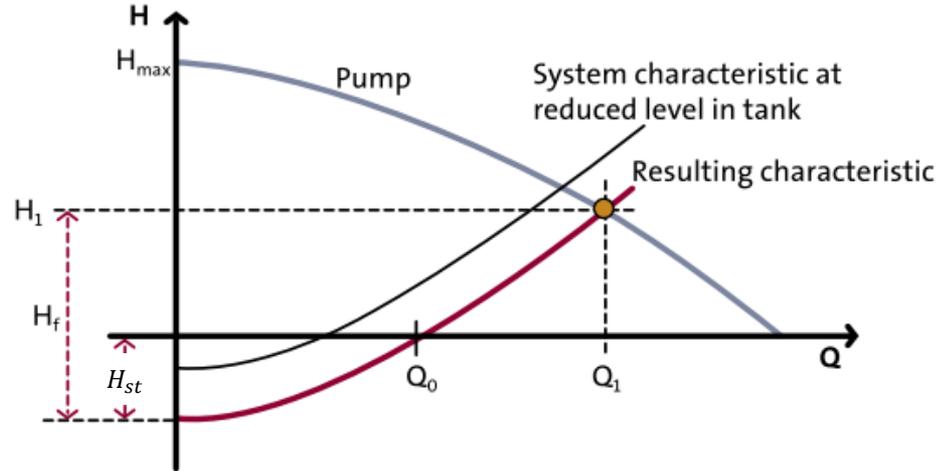
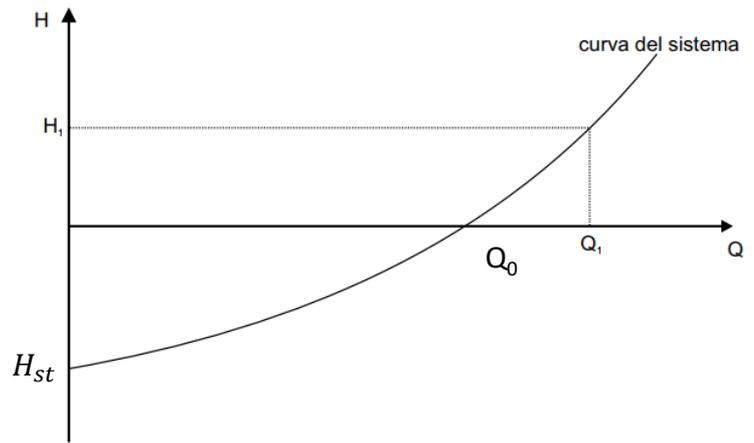
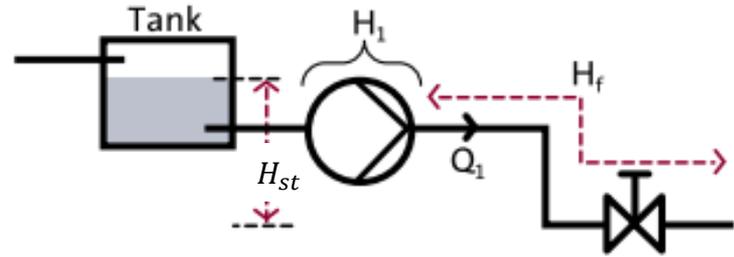
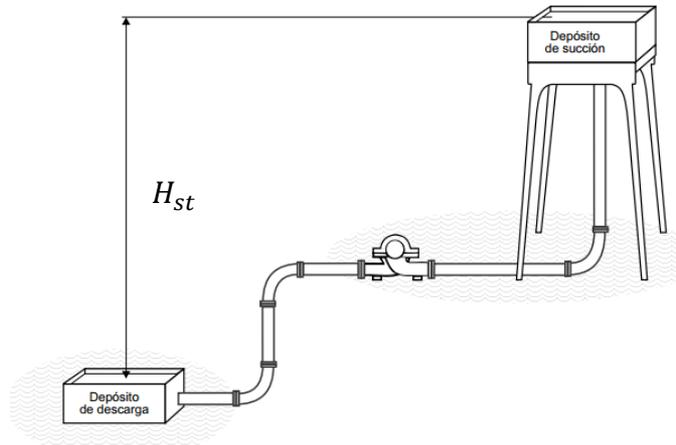


Una gran cantidad de información está abarrotada en estos gráficos y pueden ser confusos al principio. Los impulsores se fabrican al tamaño más grande para una carcasa de bomba determinada y se mecanizan o "recortan" al diámetro requerido cuando se vende la bomba.

WNTSC (usda.gov) Librería de curvas de performance

PUMP-FLO® <https://www.storefronts.pump-flo.com/>

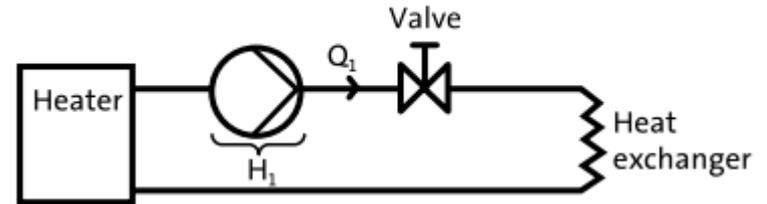
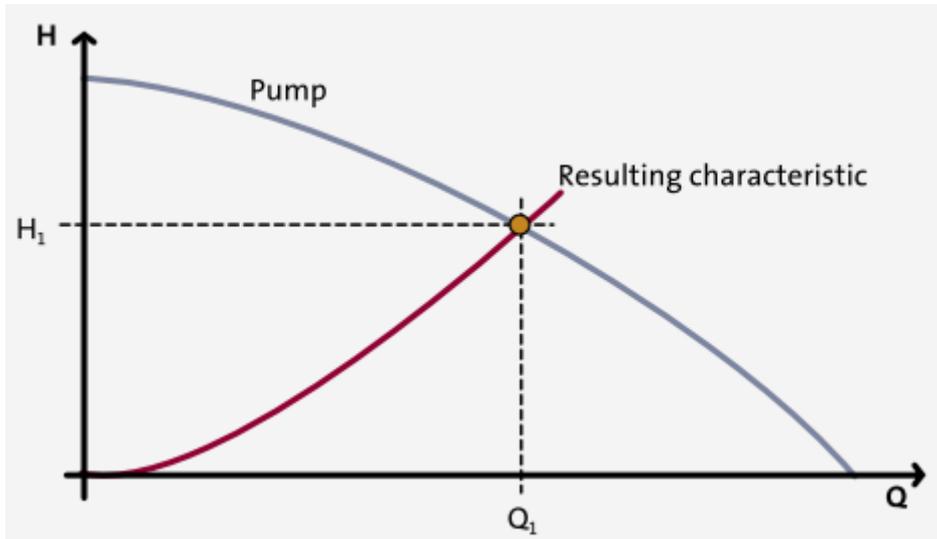
Bombas Rotodinámicas; flujo por gravedad y curva del sistema con carga estática negativa



Q_0 ; caudal resultante del flujo por gravedad; (bomba off)

Q_1 : caudal resultante por acción de la bomba (configuración *booster*) para la obtención del caudal requerido; *boost*: impulso reforzado

Bombas Rotodinámicas. Sistemas cerrados



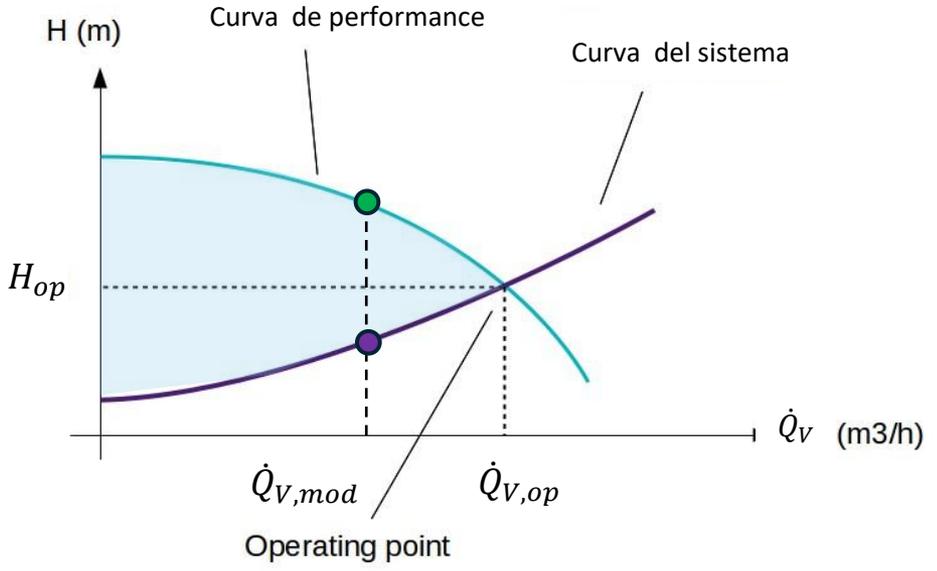
~~$$w_s = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}(\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2) + \left\{ \frac{8}{\pi^2 D^4} \left[f_D \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_L \right) + K_{LV} \right] + \frac{\Delta P_0}{\rho} \left(\frac{1}{Q_{V,0}^2} \right) \right\} Q_V^2 \quad J \cdot kg^{-1}$$~~

$$w_s = \left\{ \frac{8}{\pi^2 D^4} \left[f_D \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_L \right) + K_{LV} \right] + \frac{\Delta P_0}{\rho} \left(\frac{1}{Q_{V,0}^2} \right) \right\} Q_V^2 \quad J \cdot kg^{-1}$$

Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación por modificación de la curva del sistema

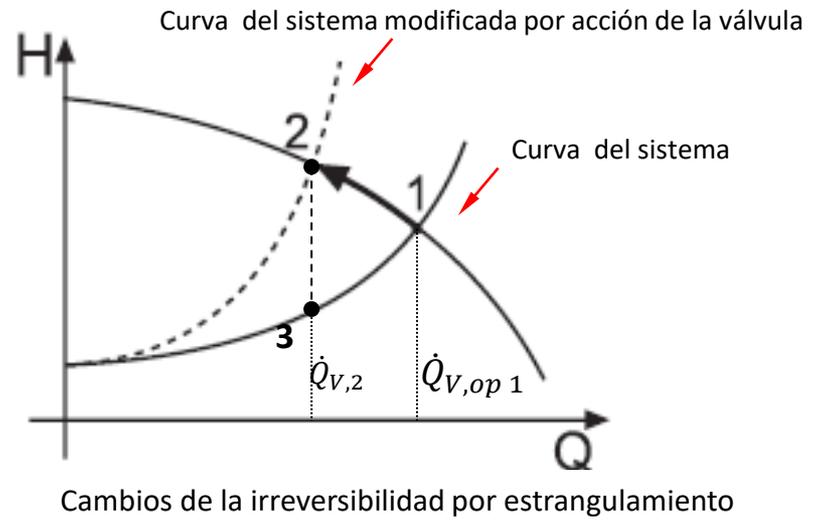
Caudales más altos que el asociado con el punto de convergencia de las dos curvas son inaccesibles, para la curva del sistema definida.

A un caudal $\dot{Q}_{V,mod}$ más bajo que el del punto operativo, la diferencia entre la curva de performance y la curva del sistema representa la energía por unidad de masa que debe absorber (o disipar) una válvula u otro dispositivo que absorba o disipe energía, si se desea obtener (controlar) el caudal a un valor inferior a $\dot{Q}_{V,op}$.



Operación de una válvula

Una válvula (de control) convierte la energía mecánica útil en energía interna que disipa como calor. Ejemplo, la diferencia 2-3 entre las dos curvas en el punto con el caudal $\dot{Q}_{V,2}$ inferior al punto de operación $\dot{Q}_{V,op1}$ representa la energía convertida en energía de disipación para mantener el flujo más bajo.

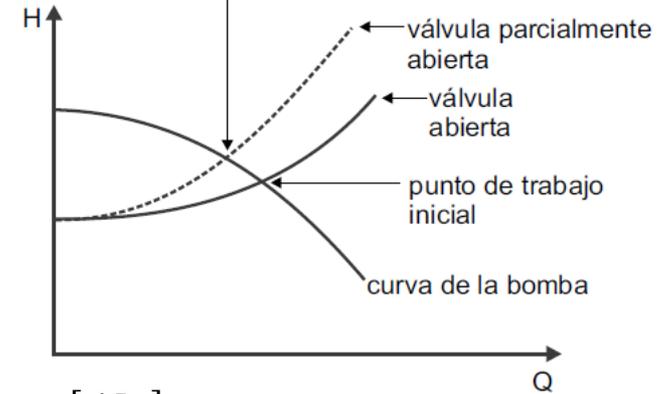
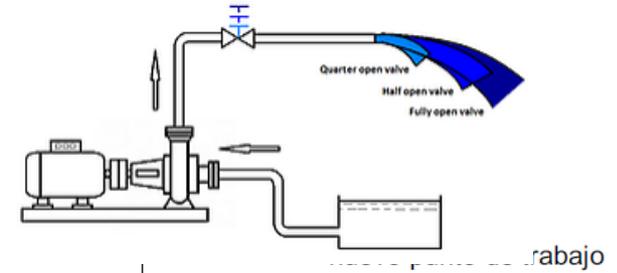


Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación por modificación de la curva del sistema

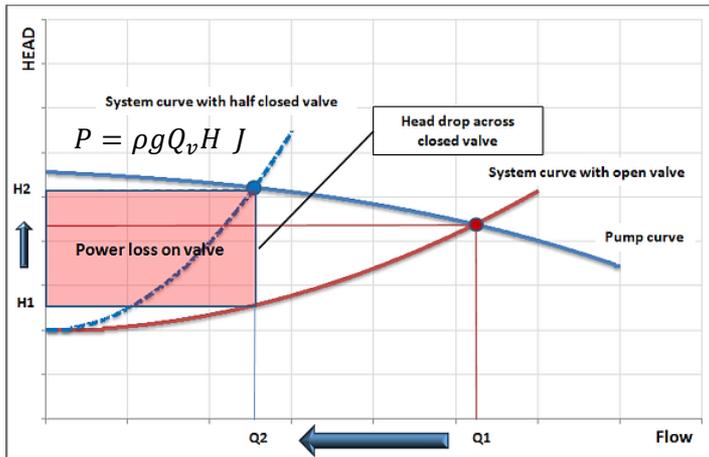
Operación de una válvula

La válvula de control estrangulada simplemente se suma a las pérdidas permanentes del sistema, a las irreversibilidades que se estimaron con la válvula completamente abierta. Al estrangular la válvula, se ha creado un nuevo sistema con mayores pérdidas.

Dado que el *shutoff* de la bomba sigue siendo el mismo, y que la curva del sistema sigue una ley cuadrática relativa al flujo, el giro de la curva del sistema en sentido contrario a las agujas del reloj hace coincidir a esta con la curva inherente de la bomba al caudal correspondiente.



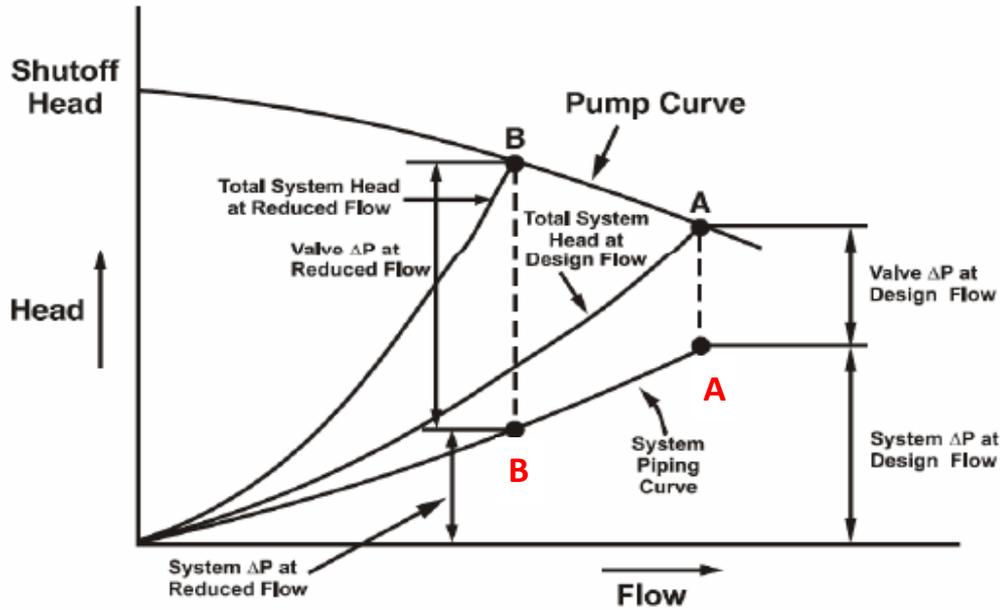
$$H_s = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) + \frac{1}{2g} (\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2) + \frac{8}{g\pi^2 D^4} \left[f_D \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_L \right) + K_{LV} \right] Q_v^2 + \left[\frac{\Delta P_o}{gQ_{vo}^2} \right] Q_v^2 \quad m$$



Criterio de funcionamiento de válvulas de control: se requiere asegurar una caída de presión de al menos 0,7 bar (100 psi) para un buen control, y la disipación que provee se encuentra en 15 – 25 % de la irreversibilidad total de la línea

Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación por modificación de la curva del sistema

Operación de una válvula

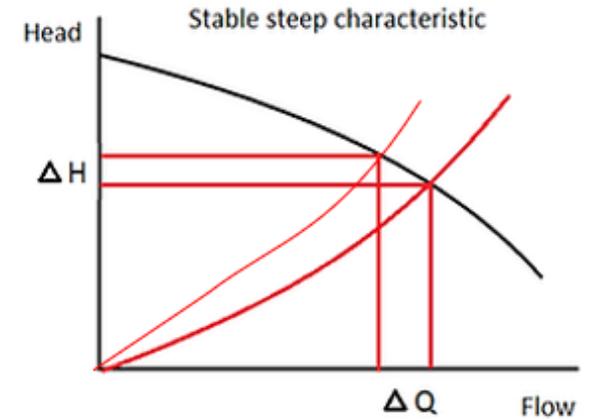


A: Condición del sistema (carga vs caudal) sin incluir válvula (el punto de operación no es **A**)

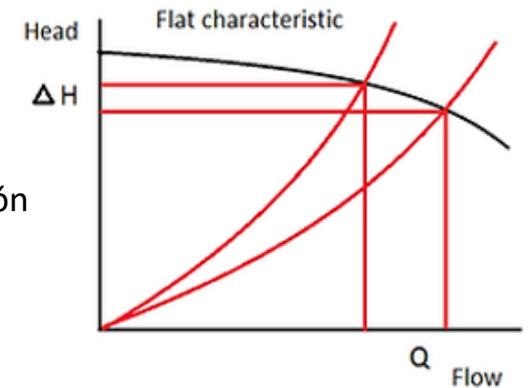
A: punto de operación del sistema con válvula incluida

B: condición del sistema con válvula parcialmente abierta incluida

B: condición del sistema sin incluir válvula parcialmente abierta



Un cambio dado ΔH de la carga provoca un pequeño cambio en el flujo Q



Un cambio dado ΔH de la carga provoca un gran cambio en el flujo Q . Mas adecuado para el control de la operación.

Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación por modificación de la curva del sistema

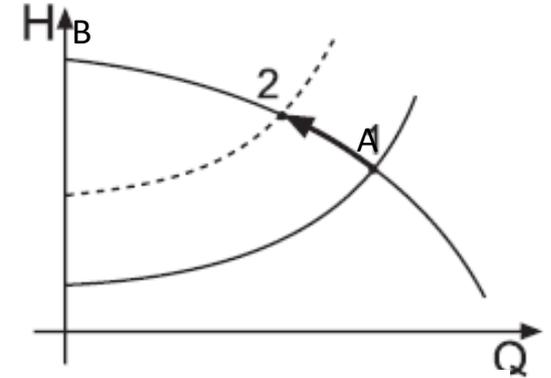
Otras formas de modificación del punto de operación

Operativos

cambios en las cotas de los líquidos; variación en las presiones de los depósitos

No propiamente operativos (puntos de trabajo en sistemas nuevos):

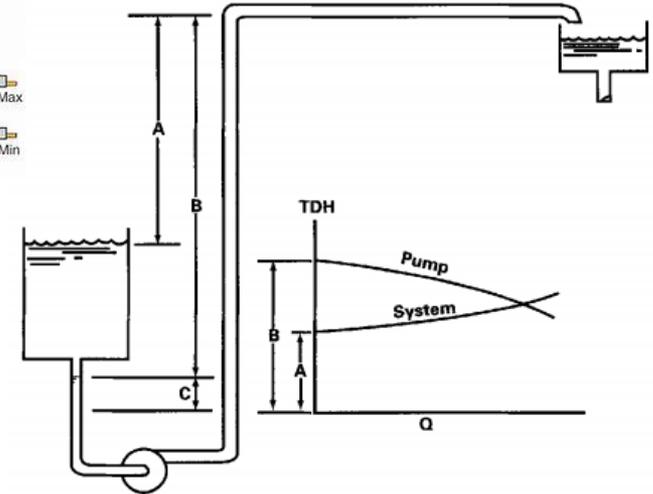
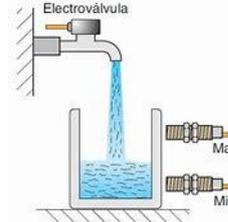
cambio en el diámetro de las tuberías; agregar o quitar accesorios en la línea; modificación del *layout* de las tuberías o modos de distribución.



Cambios en la altura estática

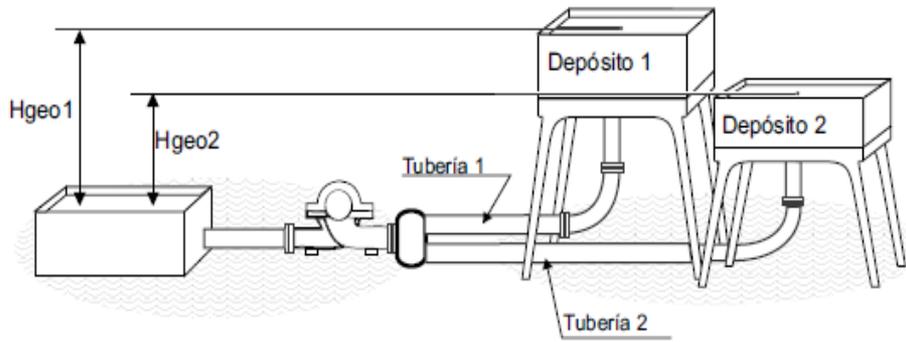
Sistema autocontrolado o auto balanceado

El control del caudal depende del control de nivel del tanque s de suministro

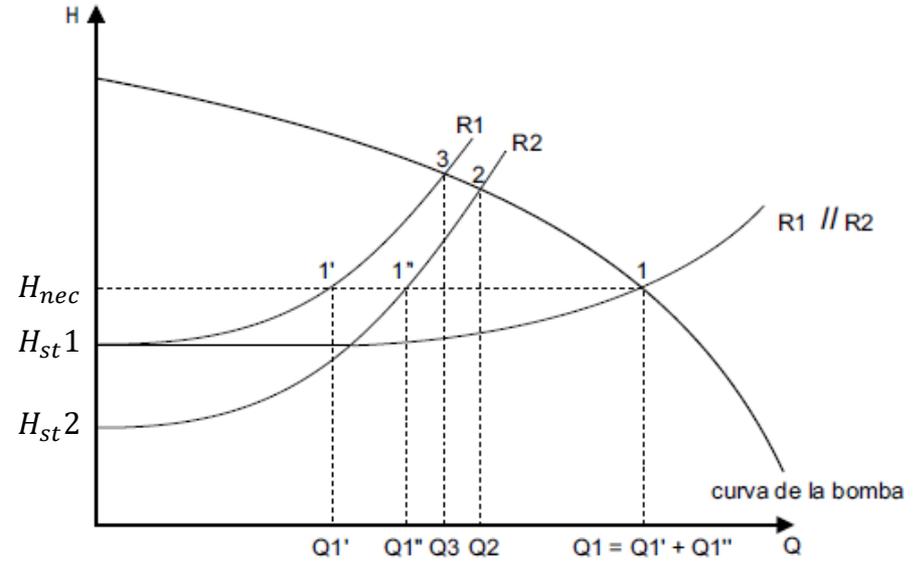


Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación por modificación de la curva del sistema

Bombeo independiente o simultáneo a 2 o + posiciones de descarga.



Modificación del punto de operación por división de flujo; aplanamiento de la curva del sistema



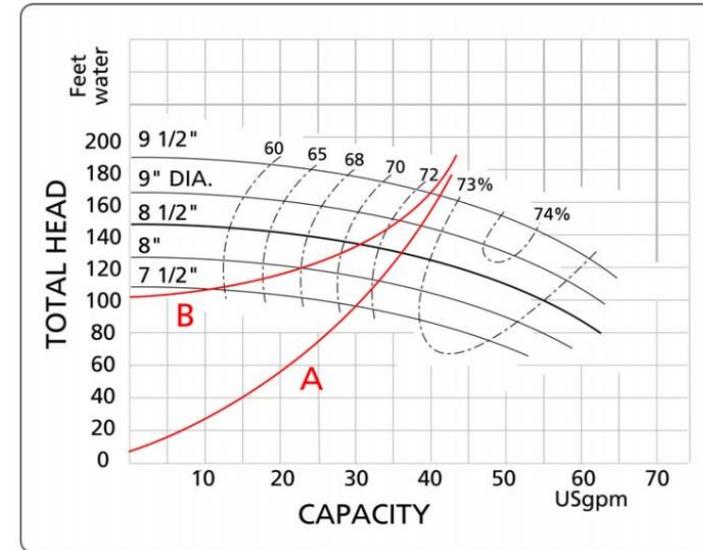
modificación de modos de distribución

Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación, por modificación de la curva de performance

Ecuaciones de afinidad

Las bombas rotodinámicas obedecen leyes de afinidad que se derivan de un análisis adimensional de tres parámetros: caudal, altura total y potencia. Impulsores de igual diseño son geoméricamente similares y funcionan en condiciones dinámicamente similares.

Suposición: dos puntos operativos deben tener la misma eficiencia. La relación entre dos puntos de operación, 1 y 2, depende de la forma de la curva del sistema. Aplica para la curva A, no así para la B, la cual atraviesa mayor cantidad de líneas de isoeficiencia



3 relaciones básicas:

1. La capacidad varía directamente con el diámetro del impulsor y velocidad.
2. La altura varía directamente con el cuadrado del diámetro y la velocidad del impulsor.
3. La potencia varía directamente con el cubo de diámetro y velocidad del impulsor.

$$\frac{\dot{Q}_{V1}}{\dot{Q}_{V2}} = \left(\frac{rpm_1}{rpm_2}\right) \left(\frac{D_1}{D_2}\right) \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{rpm_1}{rpm_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad \frac{bhp_1}{bhp_2} = \left(\frac{rpm_1}{rpm_2}\right)^3 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$$

$$\frac{rpm}{rpm_1} = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_{V1}} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{bhp}{bhp_1}} \quad \frac{D}{D_1} = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_{V1}} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{bhp}{bhp_1}}$$

PUMP SYSTEM ANALYSIS
AND SIZING

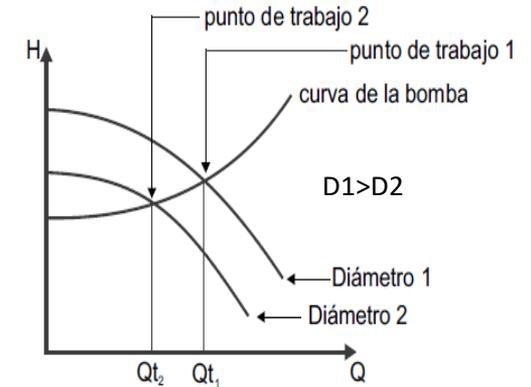
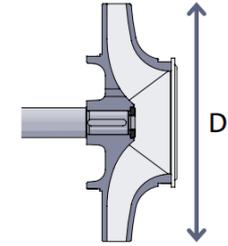
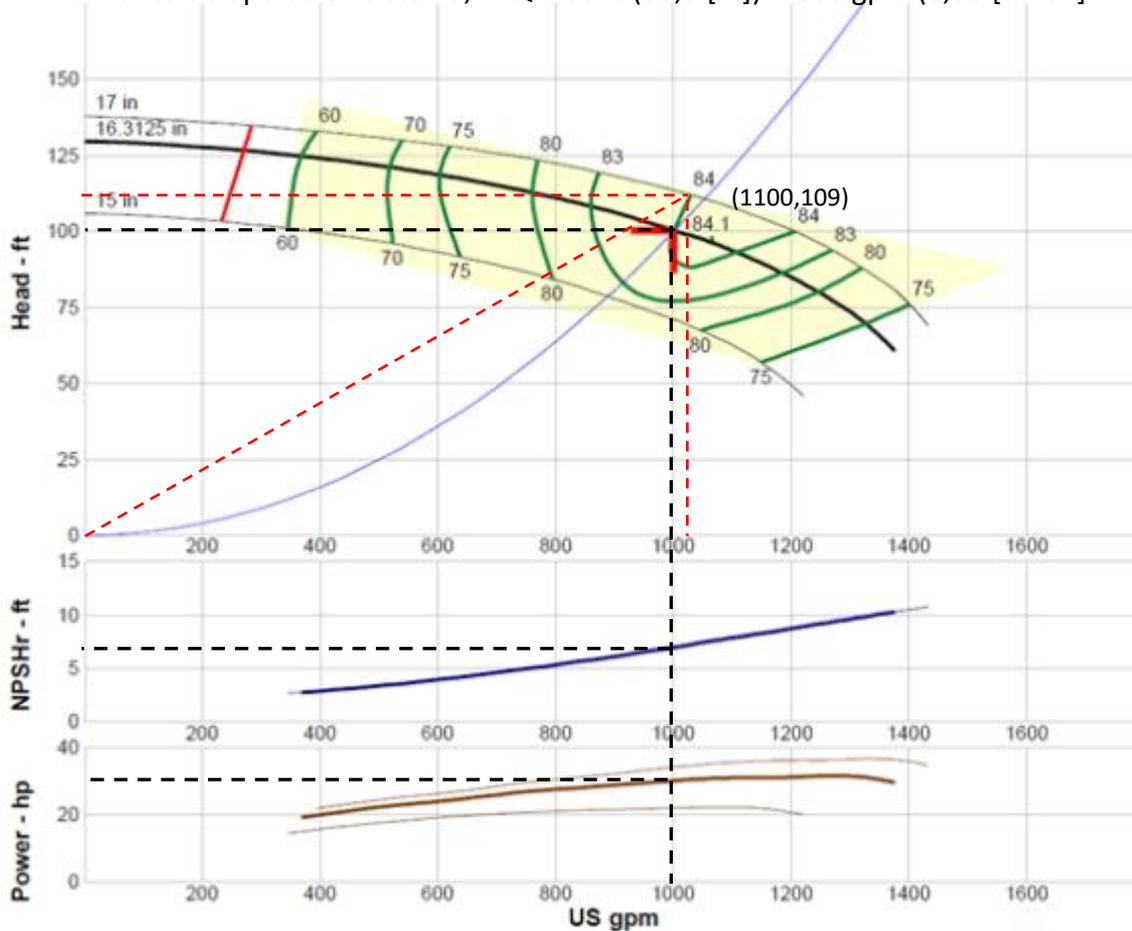
JACOBS ENGINEERING INC.

© 2000

Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación, por modificación de la curva de performance

Modificación del diámetro del impulsor

Punto de operación sistema, H-Q: 100 ft (30,5 [m]) -1000 gpm (0,06 [m³.s⁻¹])

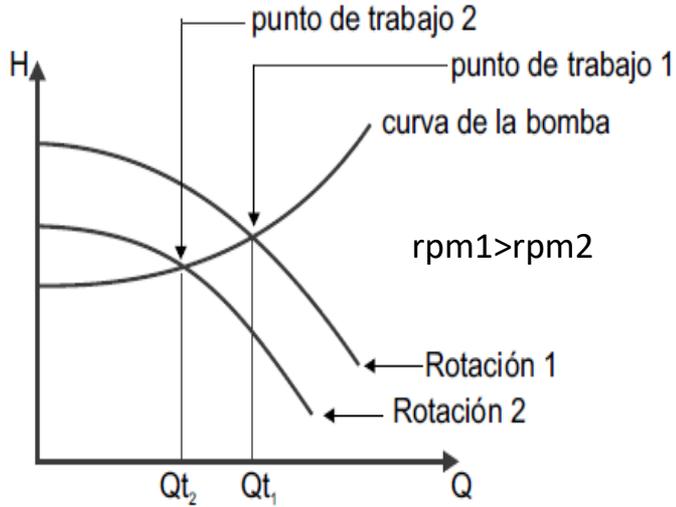


$$\frac{D}{D_1} = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_{V1}} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{bhp}{bhp_1}}$$

$$\frac{D}{D_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{H}{H_1}} D_1 = \sqrt{\frac{100}{109}} 17'' = 16,3''$$

Bombas Rotodinámicas; modificación del punto de operación, por modificación de la curva de performance

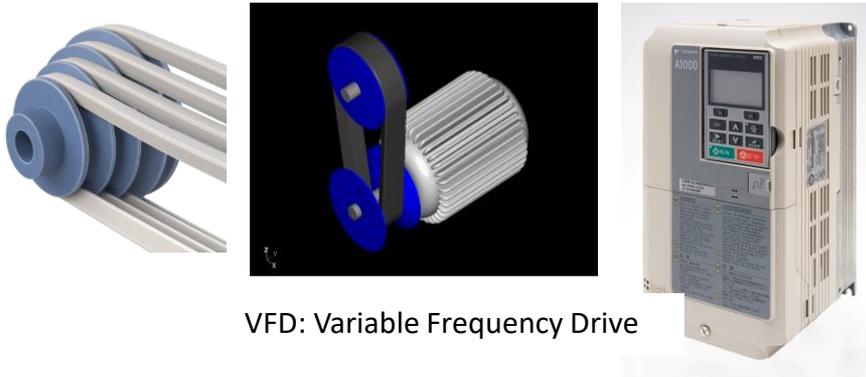
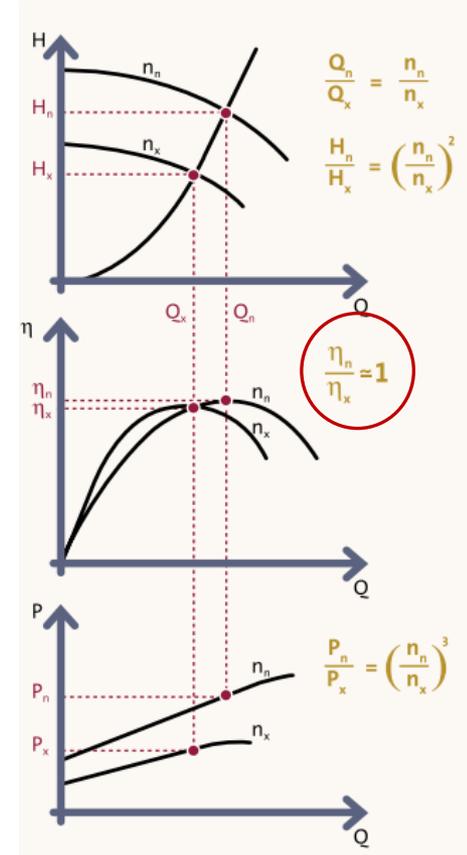
Variación de la velocidad de rotación del impulsor



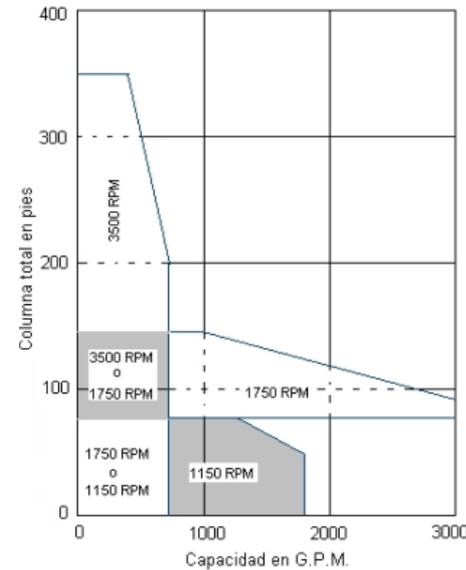
Relación rpm a diámetro ccte

Ecuaciones de afinidad

$$\frac{rpm}{rpm_1} = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_{V_1}} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{bhp}{bhp_1}}$$



VFD: Variable Frequency Drive



AC Electric Motor Speeds—60 Hz

N (No. Poles)	rpm
2	3600
4	1800
6	1200
8	900
10	720
12	600

