

UNIDAD DE GESTIÓN DEL PROYECTO



Curso de capacitación: EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SERVICIOS AUXILIARES: Bombas y ventiladores

Expositor: Ing. Victor Arroyo – Consultor Nacional Proyecto ZIS
Lima, 08 al 22 de julio de
2021

Operado por:



Punto focal The GEF:



Financiado por:



Implementado por:



MODULO 2

Eficiencia en bombas de agua

1. Introducción
2. Funcionamiento de una bomba centrífuga
3. Curvas características de una bomba centrífuga
4. Métodos de control de una bomba
5. Deterioro de una bomba
6. Oportunidades de eficiencia energética
7. Preguntas

Introducción

EL SISTEMA DE BOMBEO

Un sistema de bombeo de agua está conformado por:

- Red de carga del sistema (aguas arriba)
- Bomba centrífuga
- Acople motor-bomba
- Motor de inducción trifásico
- Variador de frecuencia - VFD (opcional)
- Centro de Control de Motores (CCM) ó el arrancador correspondiente.



Introducción

EL SISTEMA DE BOMBEO

Los sistemas de bombeo deben ser cuidadosamente diseñados y operados para :

- Funcionar adecuadamente.
- Producir a un costo mínimo.
- Cumplir con los requerimientos de los usuarios.



Introducción

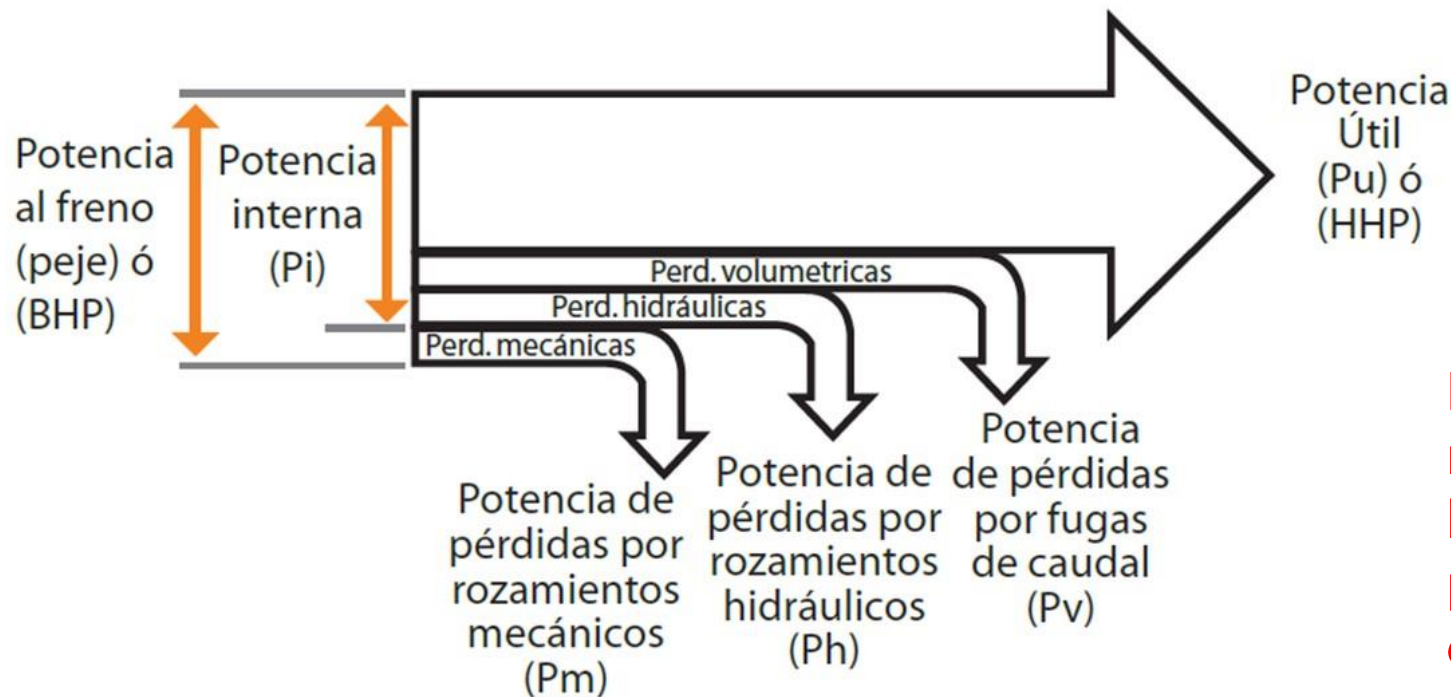
Las bombas en general se utilizan en todas las industrias y consumen gran parte de la electricidad en las plantas.



Introducción

En una bomba típica cerca del 50% de la potencia alimentada (potencia al freno) es aprovechada útilmente por el fluido; el resto se pierde inevitablemente.

Pérdidas de potencia de una bomba



Las pérdidas son mayores cuando la bomba no trabaja a su punto de máxima eficiencia!



Introducción

Los costos que implica instalar y operar una bomba durante su vida útil (15-20 años) son aproximadamente:

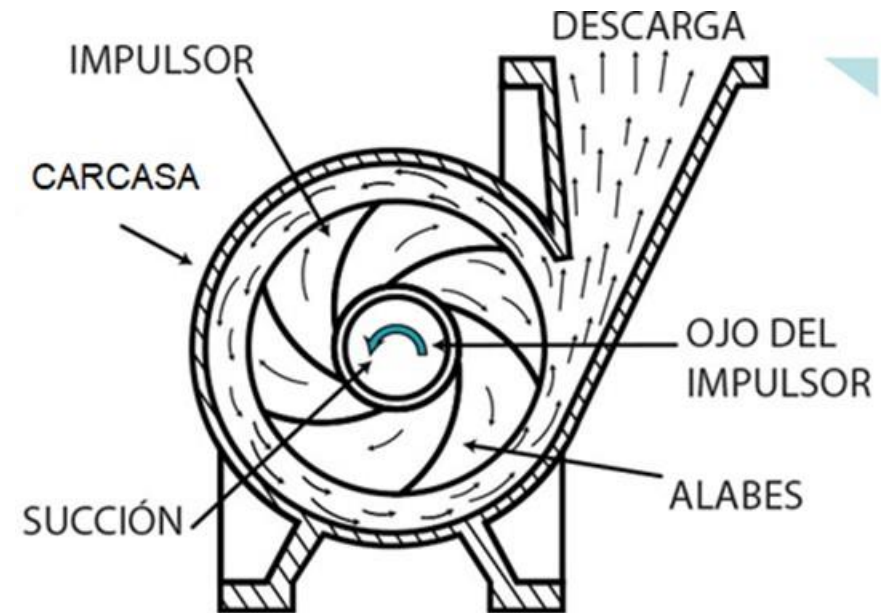
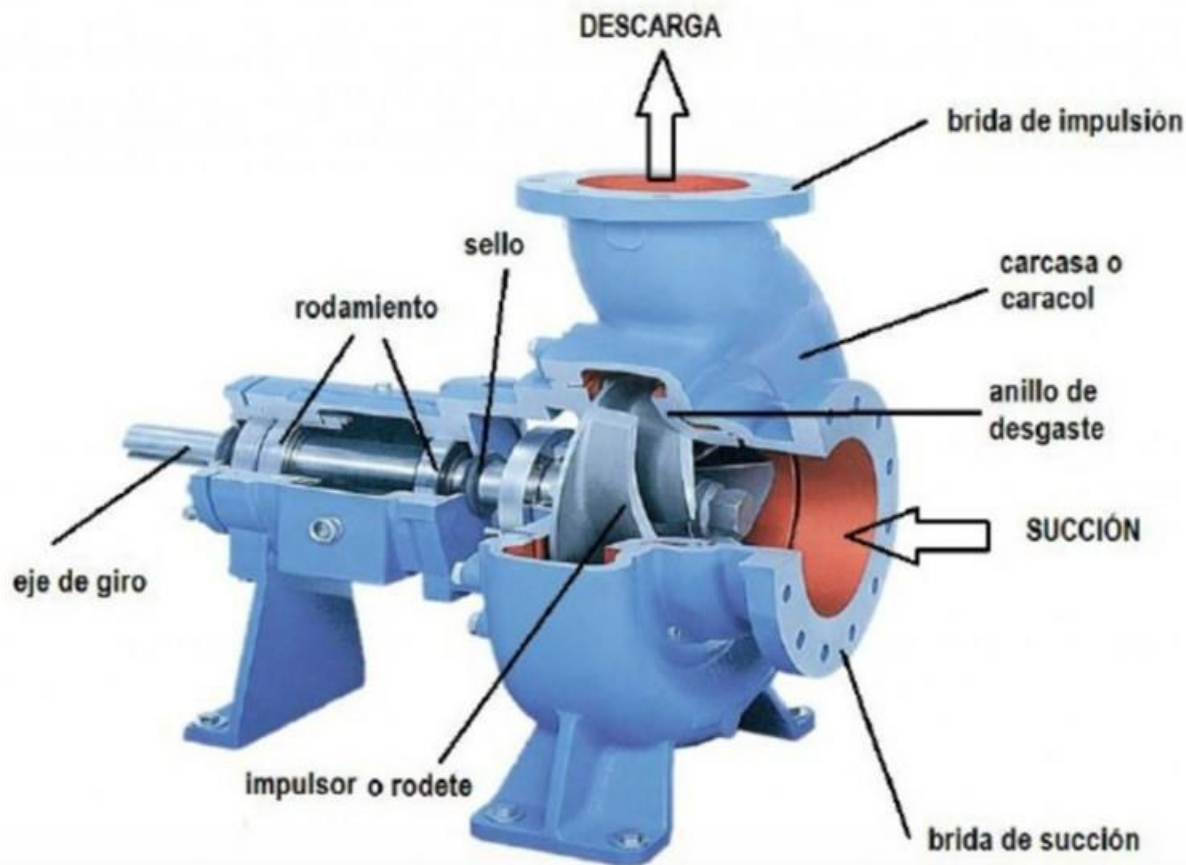
- Equipo e instalación: 30%
- Mantenimiento: 38%
- Energía para operar: 32%

Pensemos en el costo de la energía al adquirir y operar una bomba!



Funcionamiento de una bomba centrífuga

Las bombas centrífugas se usan en una vasta mayoría de aplicaciones industriales de bombas.



La bomba imparte energía al fluido por acción centrífuga

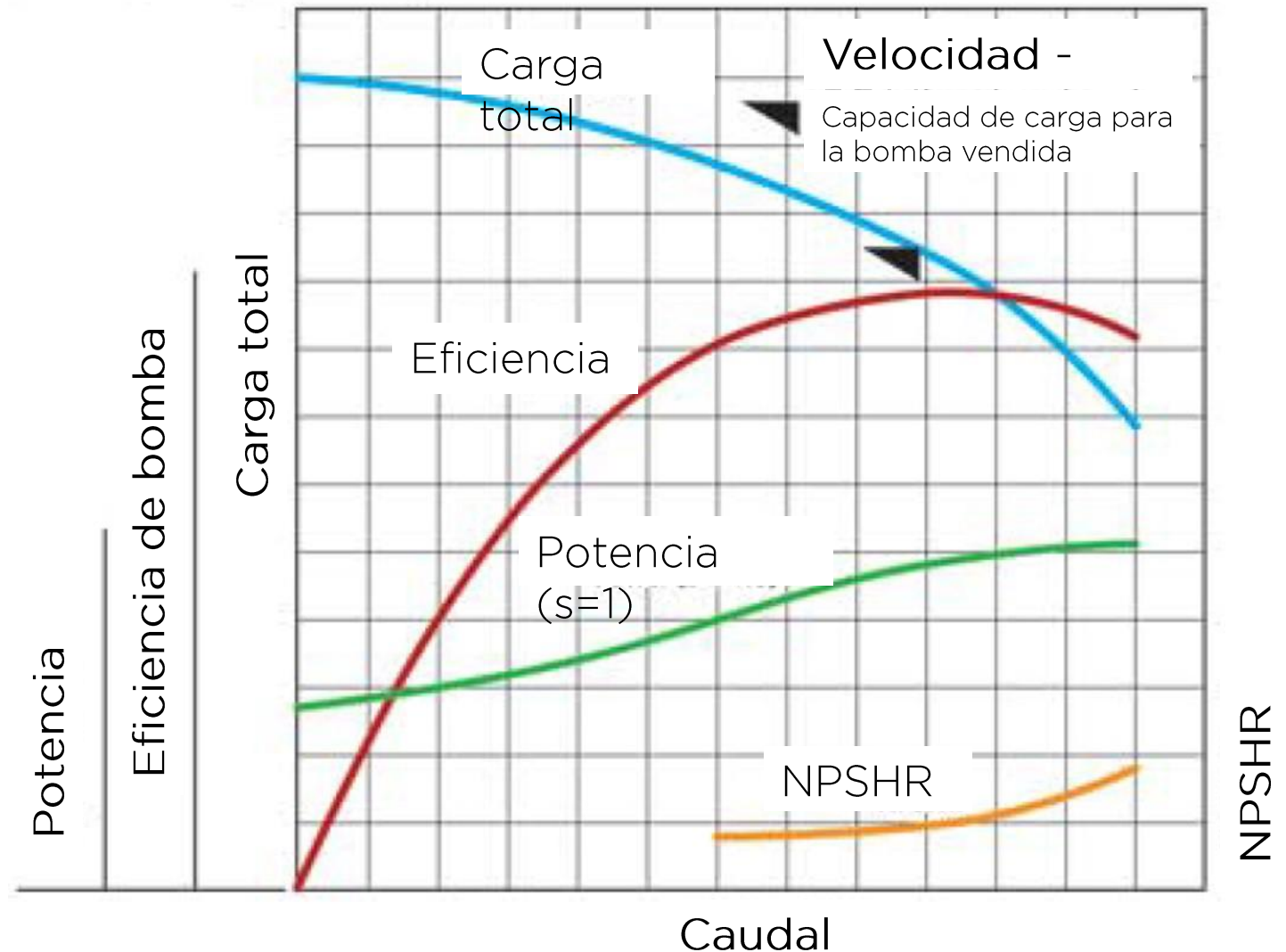
Curvas características de una bomba centrífuga

El fabricante debe proveer las curvas de la bomba:

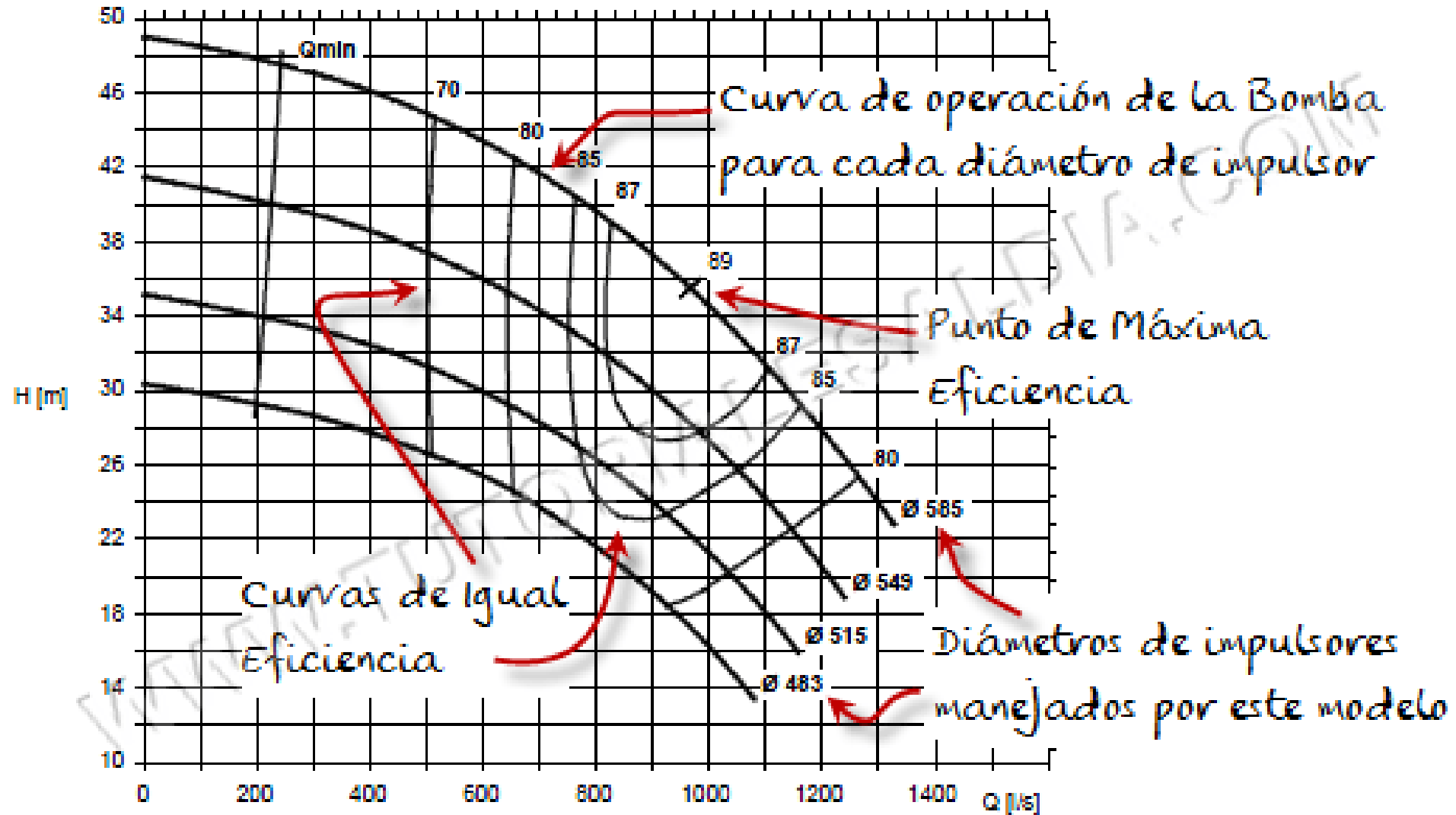
- Altura o carga vs. caudal
- Eficiencia vs. caudal
- Potencia (al eje) vs. caudal
- NPSHR (Net Positive Suction Head) requerido

La potencia se corregirá para fluidos diferentes al agua.

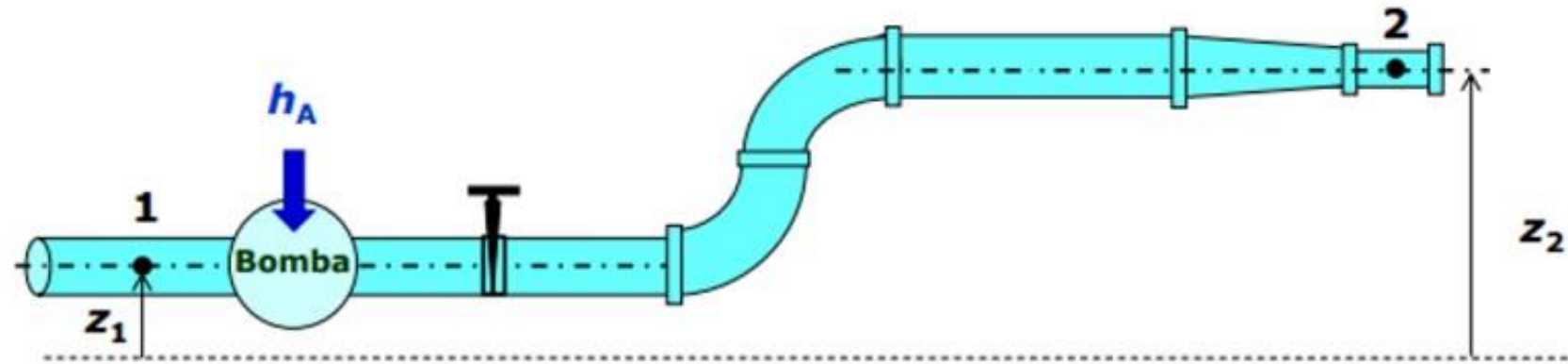
Los datos son solo para la bomba, no se incluye performance del motor.



Curvas características de una bomba centrífuga



Curvas características de una bomba centrífuga



$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_A - h_\mu = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

Ecuación general de la energía

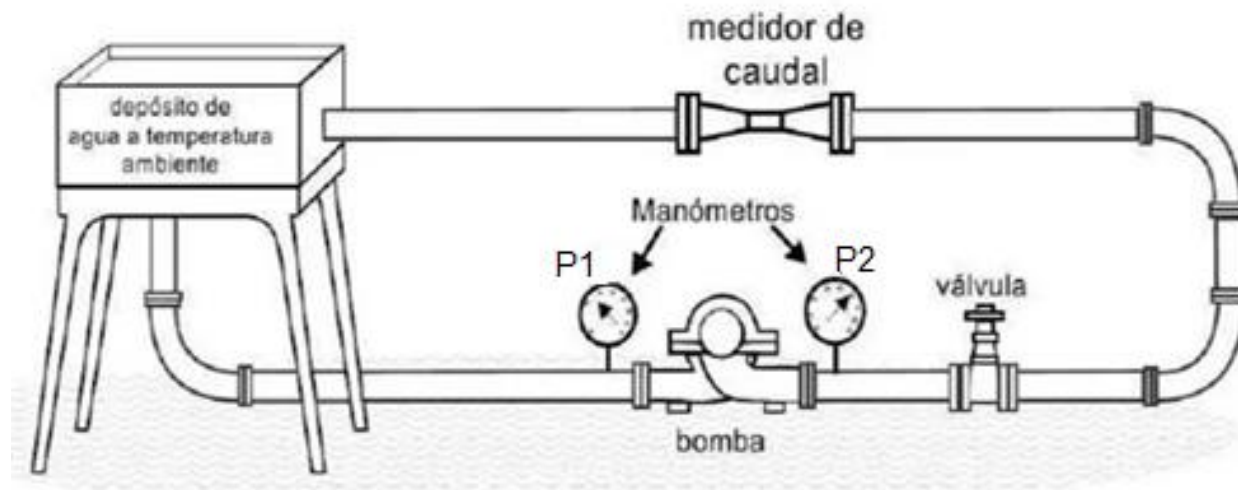
Cargas de energía (J/N) (m)

- p/γ : Trabajo de flujo por unidad de peso de fluido
- $\frac{v^2}{2g}$: Energía cinética por unidad de peso de fluido
- z : Energía potencial unidad de peso de fluido
- h_μ : Energía perdida por rozamiento por u.p.f. entre 1 y 2
- h_A : Energía aportada al fluido por u.p.f. entre 1 y 2



Curvas características de una bomba centrífuga

Esquema simplificado de un banco de ensayos

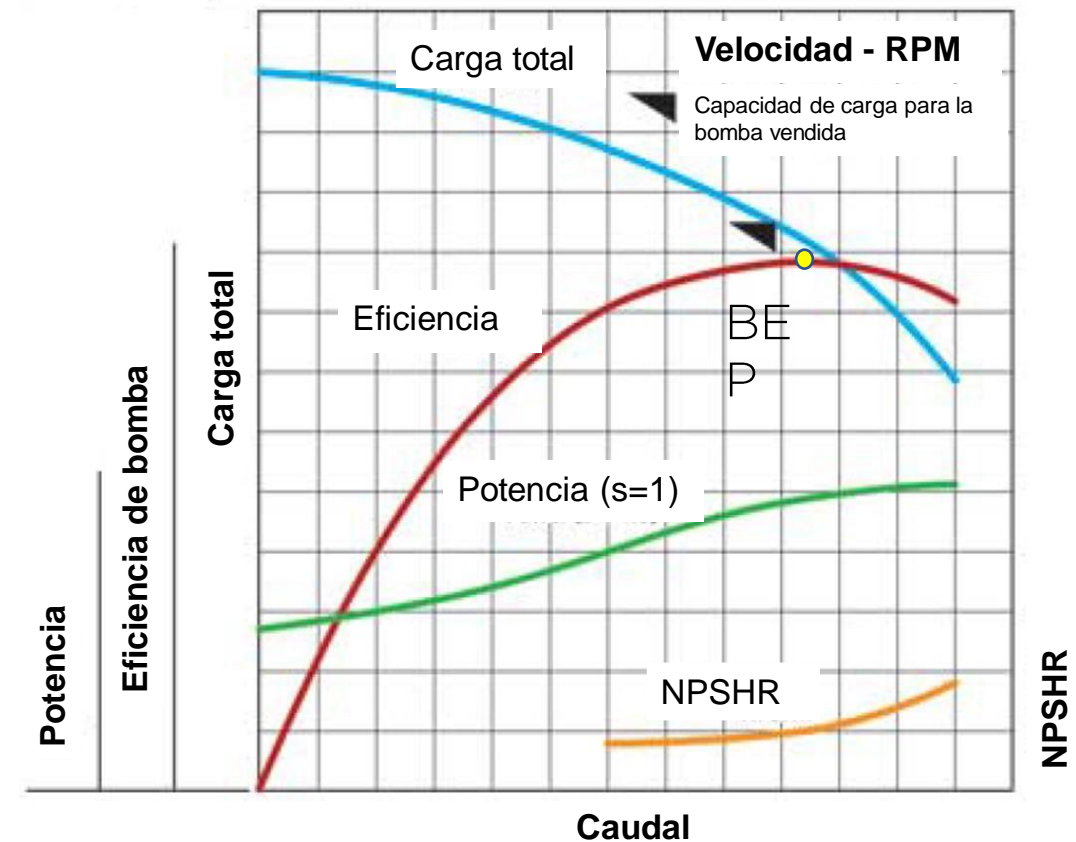


Carga total: $h_A = (P_2 - P_1) / \gamma + (V_2^2 - V_1^2) / 2g$

Potencia hidráulica: $Ph = \gamma \cdot Q \cdot H$

Potencia al eje: $Pe = \sqrt{3} V \cdot I \cdot \cos \Phi$ (curva)

Eficiencia: $n = Ph / Pe$

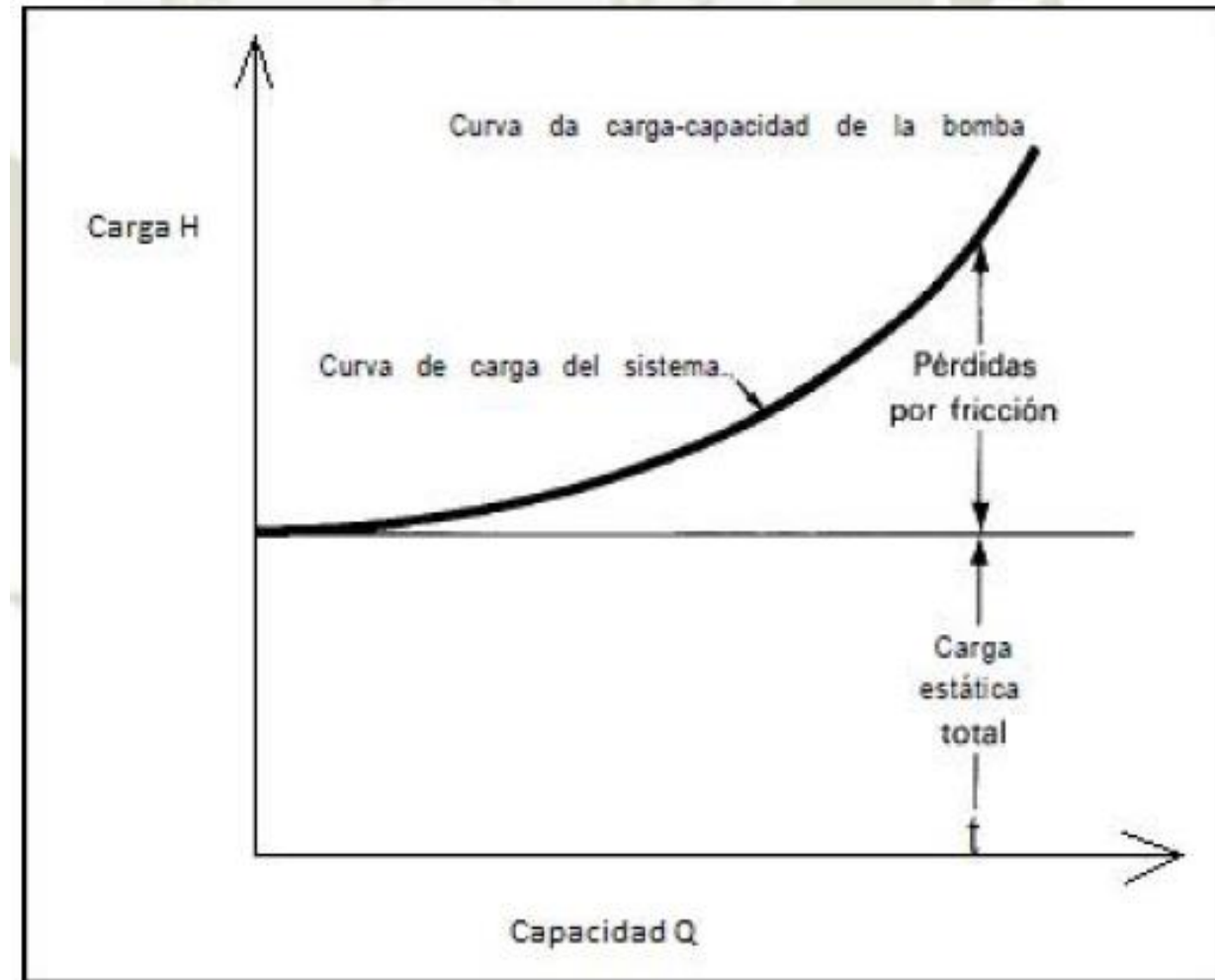
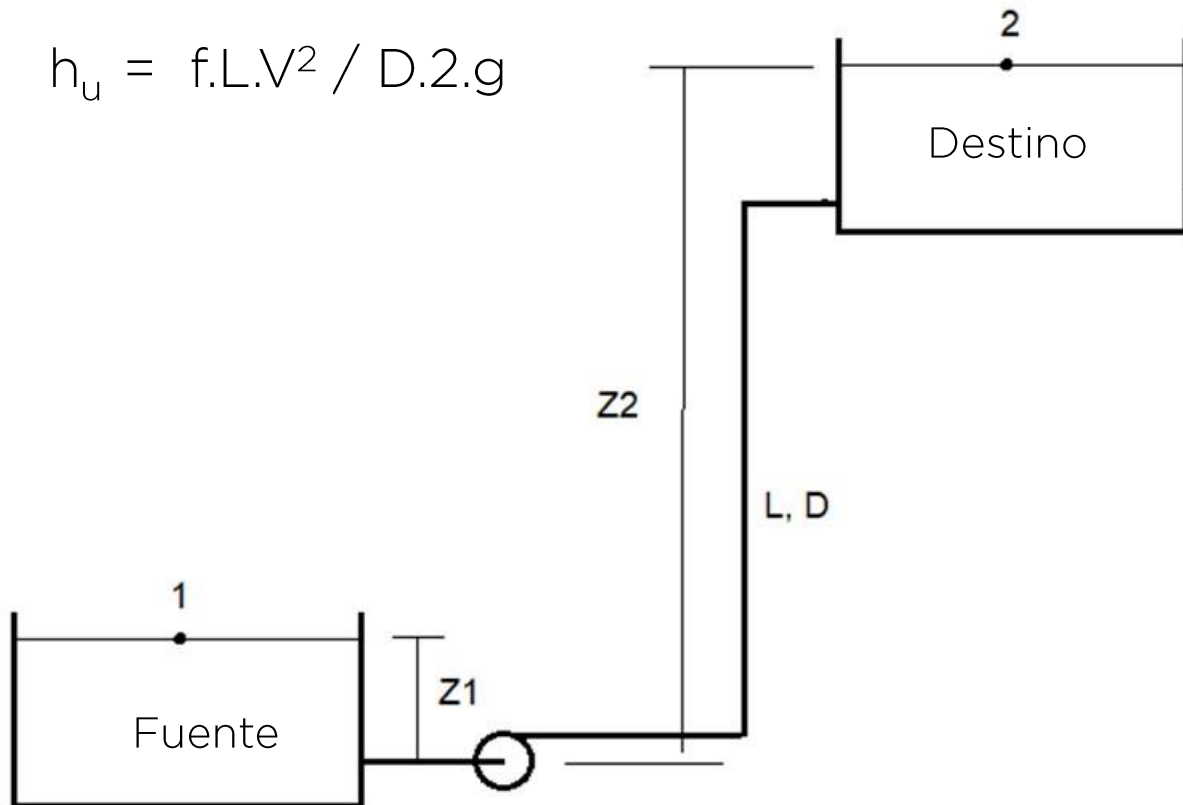


Curvas características de una bomba centrífuga

Curva del sistema (red):

$$h_A = (Z_2 - Z_1) + h_u \text{ (carga estática + pérdidas por fricción)}$$

$$h_u = f \cdot L \cdot V^2 / D \cdot 2 \cdot g$$

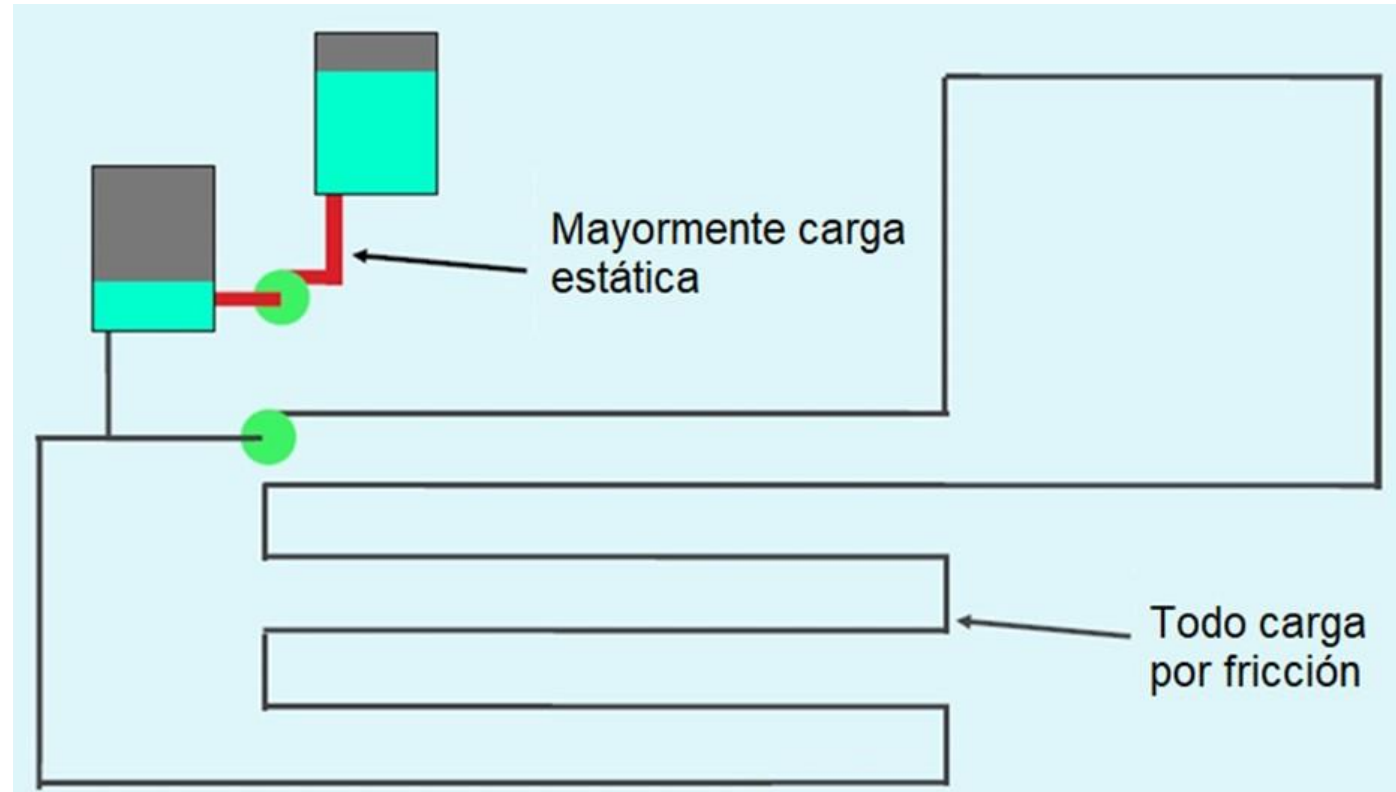


Curvas características de una bomba centrífuga

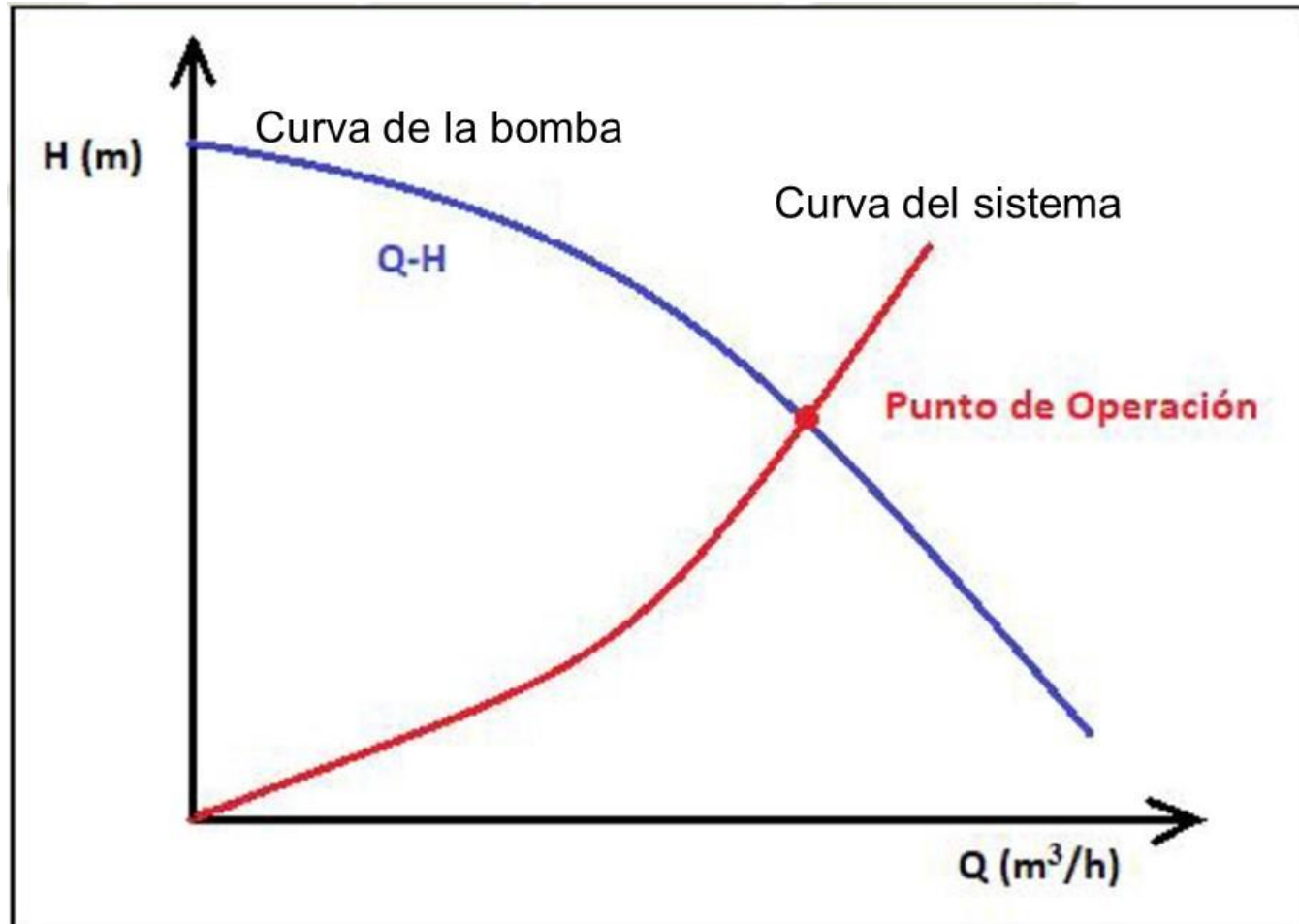
La carga por fricción se debe a la resistencia al flujo en la tubería y accesorios.

- Depende de la longitud y diámetro de la tubería, caudal, naturaleza del fluido.
- Proporcional al cuadrado del flujo.

A mayor diferencia de niveles, y a mayor fricción en la línea, se consume más energía!



Curvas características de una bomba centrífuga



El punto de operación puede variar si se producen restricciones en la tubería:

- Estrangulamiento de válvulas
- Depósitos en las paredes de la tubería
- Corrosión de la tubería

Ley de afinidad en bombas centrífugas

A. Si varía el diámetro del impulsor, D

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}; \quad \frac{ha_1}{ha_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$$

B. Si varía la velocidad de rotación, N

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}; \quad \frac{ha_1}{ha_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3$$

EJERCICIOS

1. Cuánto varía la potencia si el diámetro disminuye a la mitad?
2. Cuánto varía la potencia si la velocidad aumenta al triple?
3. Cuánto varía la capacidad total si disminuye N un 25%?



Dificultades en la evaluación de bombas

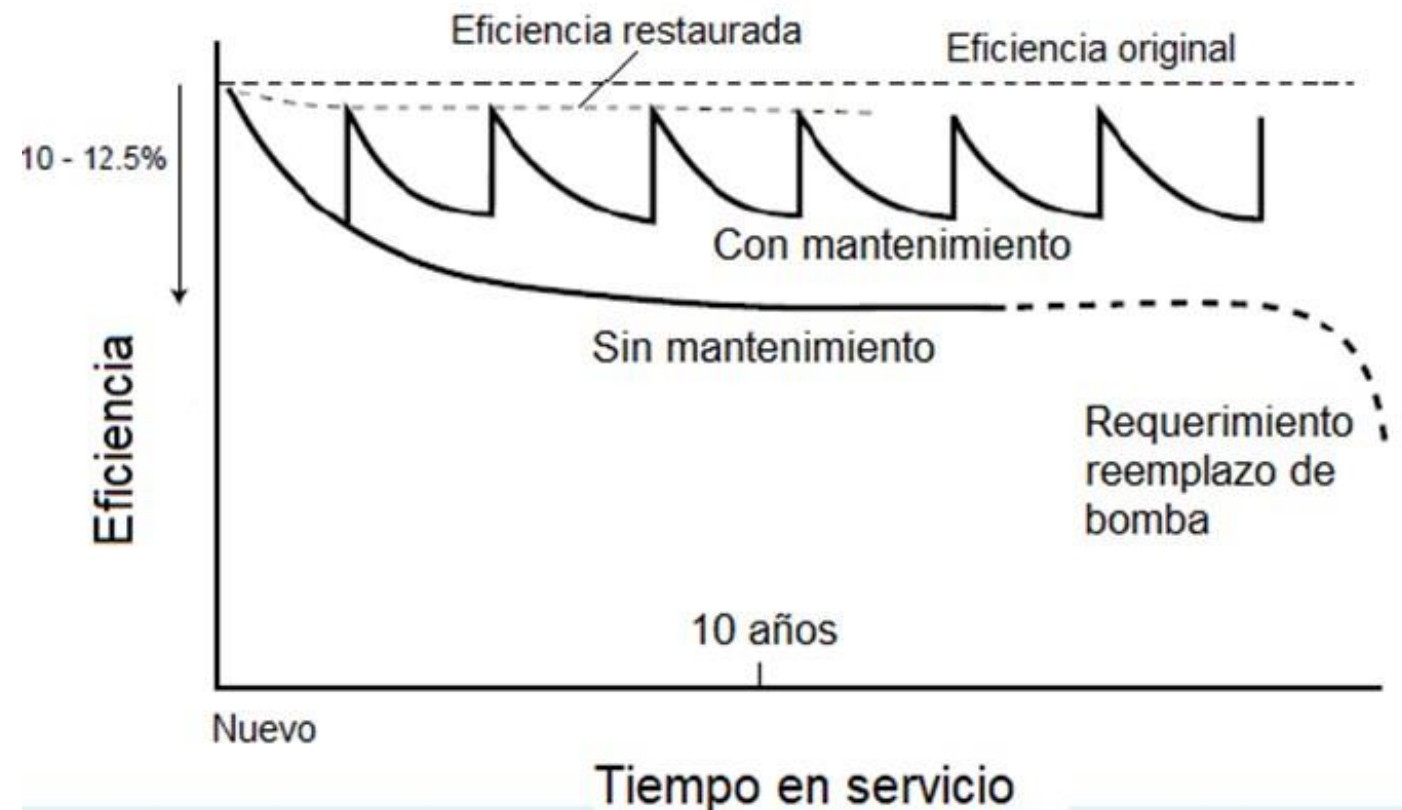
- Ausencia de información con especificaciones para evaluar la performance.
- Dificultades en la medición del caudal, y estos se estiman con frecuencia.
- Calibración indebida de manómetros y otros instrumentos:
 - La calibración no se realiza.
 - Los factores de corrección usados



El deterioro de una bomba

Una bomba tiene una vida útil entre 15 a 20 años.

- ❑ Las bombas pierden eficiencia en el tiempo, lo que usualmente no se nota.
- ❑ En las bombas grandes es útil monitorear la eficiencia para determinar cuando renovar.



El deterioro de una bomba

CAVITACIÓN:

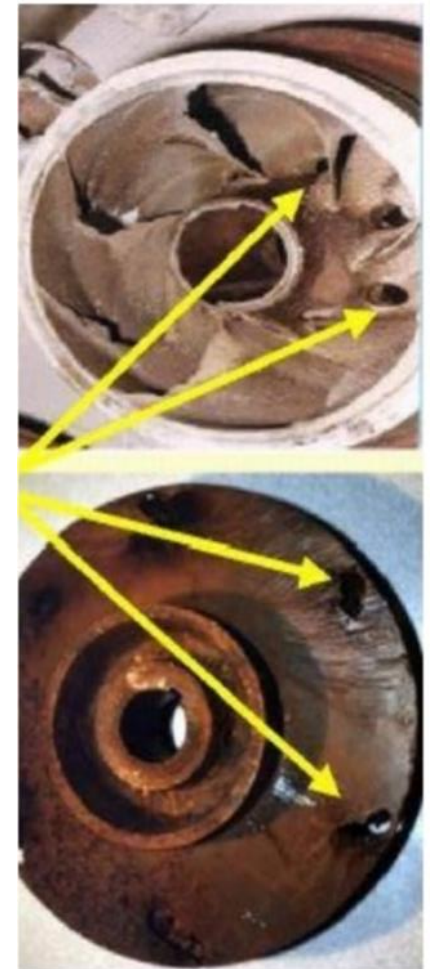
- Es la formación y explosión repentina de burbujas de vapor.
- Ocorre en el interior de la bomba donde la presión cae por debajo de la presión de vapor del fluido.

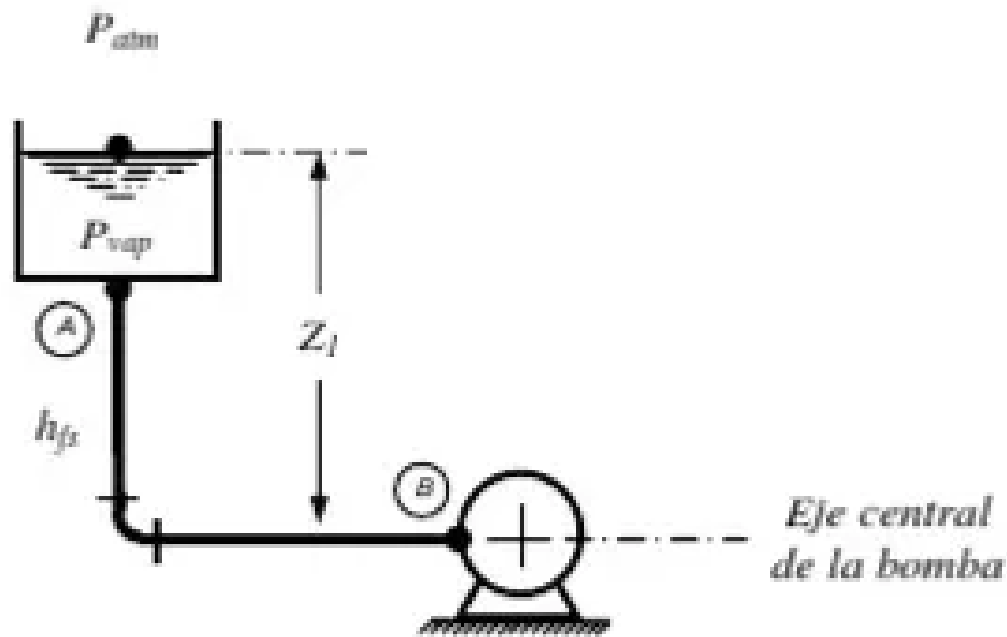
Para que una bomba no Cavite debe cumplirse:

$NPSH_{disp} \geq NPSH_{req} + 0,5$ (añadido por seguridad)

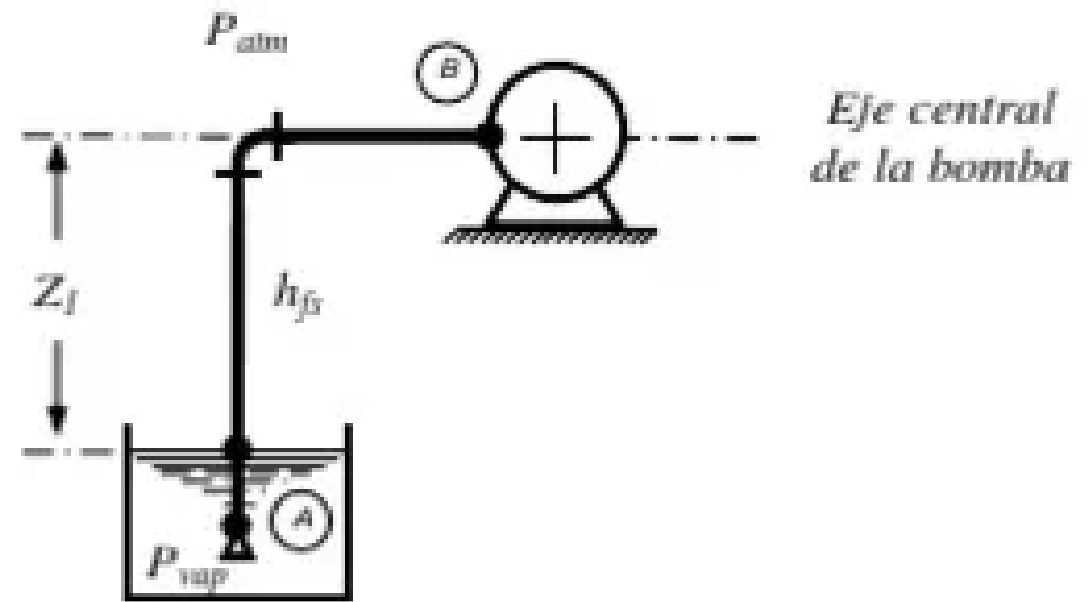
NPSH (altura neta positiva de succión):

Diferencia entre la presión del líquido en el eje del impulsor y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.





$$NPSH_d = Z_s + (P_{atm} - P_{vap}) \left(\frac{2.31}{sp \cdot gr} \right) - h_{fs}$$



$$NPSH_d = -Z_s + (P_{atm} - P_{vap}) \left(\frac{2.31}{sp \cdot gr} \right) - h_{fs}$$

$NPSH_d$ = carga neta positiva de succión disponible, ft

Z_s = columna o elevación estática de succión, ft

P_s = presión absoluta sobre la superficie del líquido en el recipiente de succión ($P_{atm} + P_{man}$) ó ($P_{atm} - P_{vacío}$), psia

P_{man} = presión manométrica de operación, psig

P_{atm} = presión atmosférica o barométrica, psia

$P_{vacío}$ = vacío en el recipiente de succión, psia

P_{vap} = presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, psia

Oportunidades de eficiencia energética

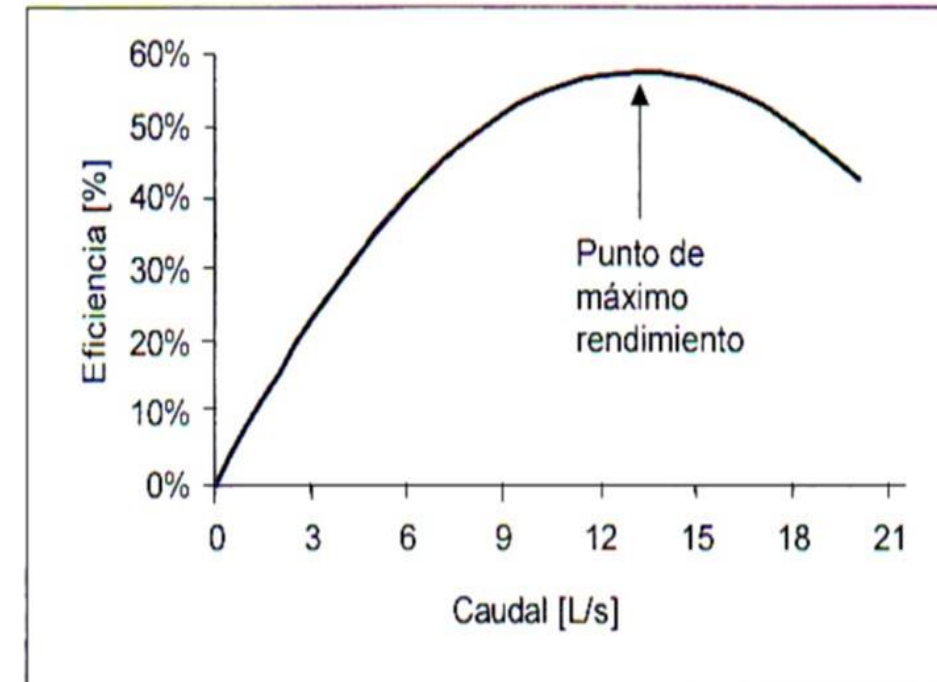
1. Elegir la bomba más eficiente para la aplicación.
2. Controlar el flujo variando la velocidad (rpm).
3. Eliminar la válvula de control de flujo / by-pass.
4. Control de arranque/parada de bomba.
5. Usar bombas en paralelo.
6. Recortar el impulsor de la bomba.



Oportunidades de eficiencia energética

1) ELEGIR LA BOMBA MÁS EFICIENTE PARA LA APLICACIÓN

- Un estudio reveló que la eficiencia promedio de bombas es del 40%, incluso el 10% está por debajo del 10%.
- El origen está en añadir factores de seguridad múltiples al momento de seleccionar la bomba.
- La presión y caudal de la bomba llegan a ser 25% más que el sistema de operación.
- Ello consume más energía y costo de mantenimiento.
- Se tiene que trabajar con el proveedor para elegir el tamaño óptimo.



Oportunidades de eficiencia energética

Para caudal de 300 gpm:

Bomba con impulsor 8"φ:

H = 60 pies

Pot. (BHP) = 6 HP

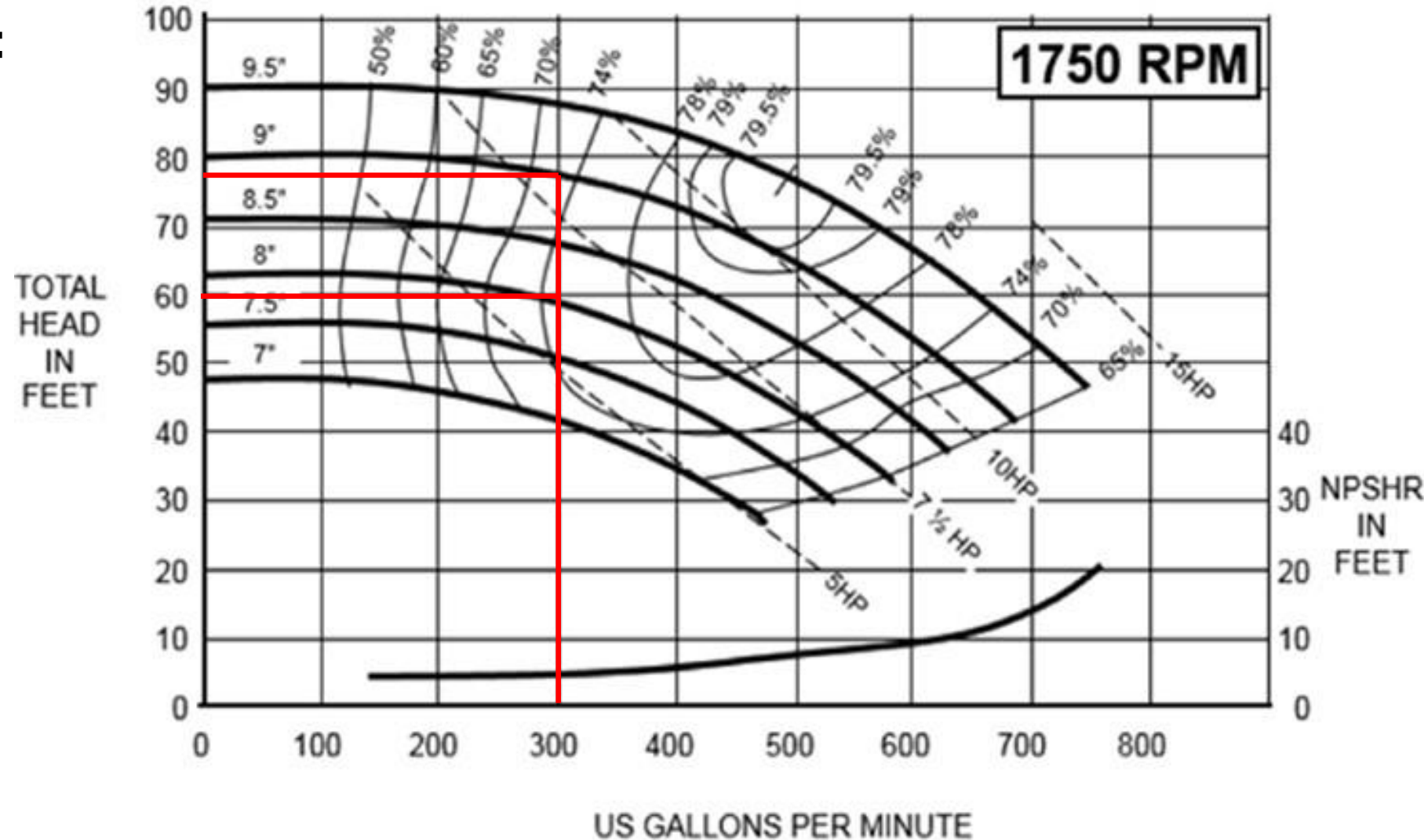
Eficiencia (BEP) = 75%

Bomba con impulsor 9"φ:

H = 78 pies

Pot. (BHP) = 8 HP

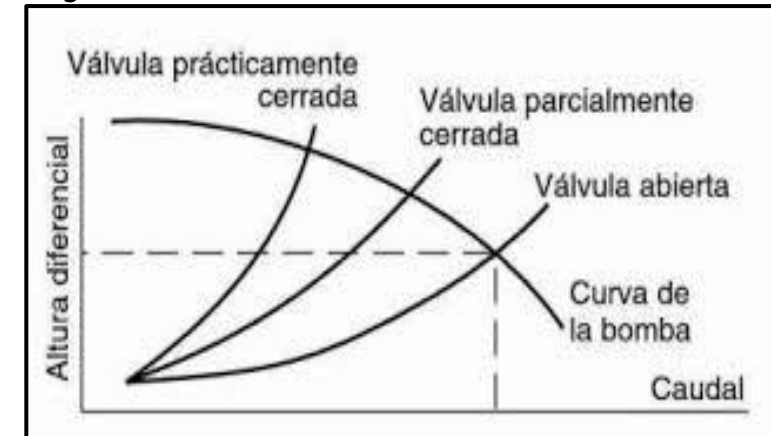
Eficiencia (BEP) = 72%



Oportunidades de eficiencia energética

1) ELEGIR LA BOMBA MÁS EFICIENTE PARA LA APLICACIÓN

- Bomba sobredimensionada:
 - Requiere control de flujo (válvula para estrangular y línea de by-pass).
 - Provee carga adicional.
 - La curva del sistema se desplaza a la izquierda.
 - La eficiencia de la bomba disminuye.



- Solución si la bomba ya se compró:

- Variar el flujo con válvula ó by-pass.
- Reducir RPM.
- Usar impulsor más chico o recortarlo.

Oportunidades de eficiencia energética

2) CONTROLAR EL FLUJO VARIANDO LA VELOCIDAD (RPM)

Explicación del efecto de variar la velocidad de la bomba:

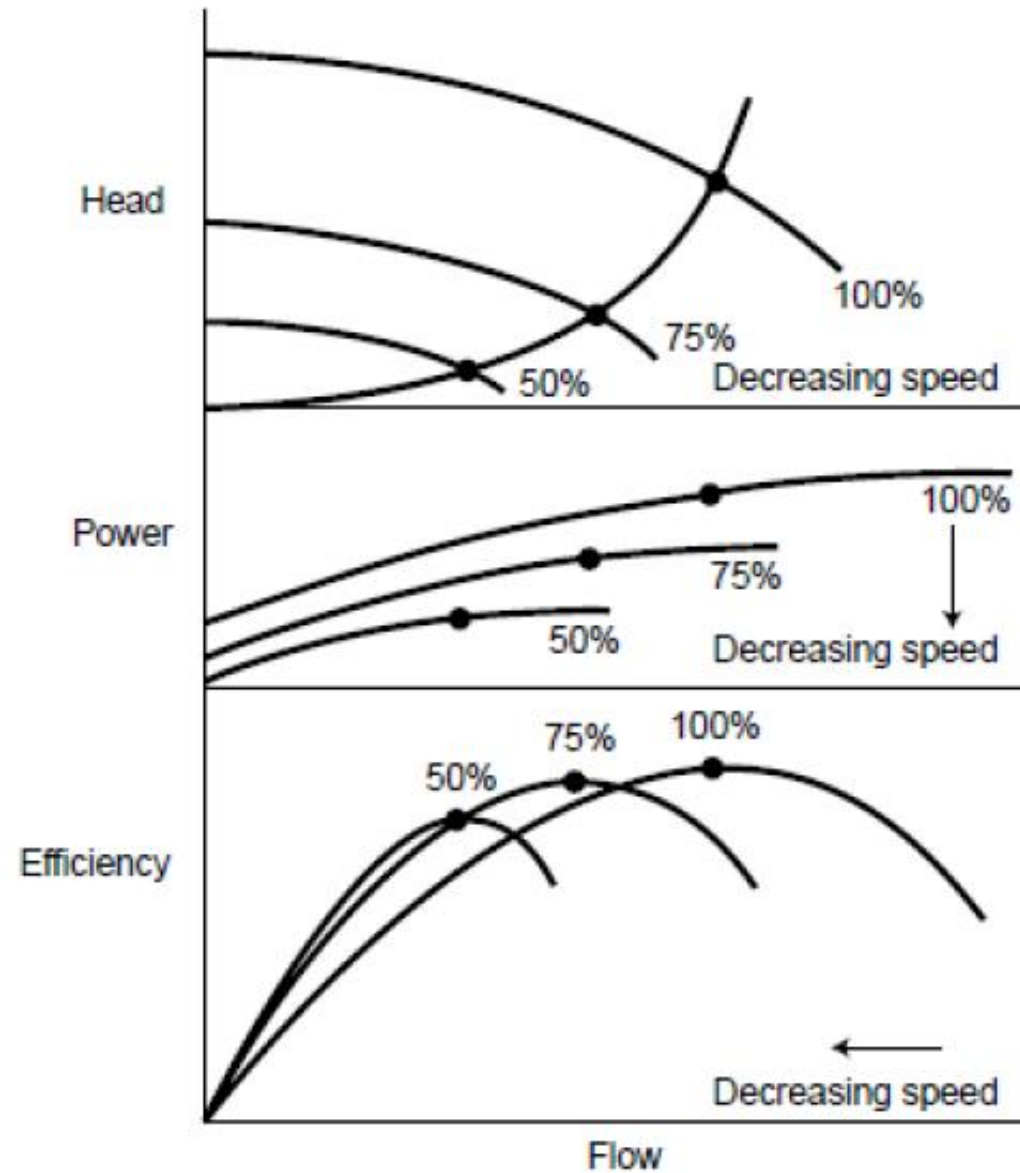
- Aplicación de las leyes de afinidad:

$$\frac{Q1}{Q2} = \frac{N1}{N2} \quad \frac{H1}{H2} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^2 \quad \frac{P1}{P2} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^3$$

- Una pequeña reducción de la velocidad (N) trae una reducción grande de la potencia (P).

P.ej. Reducir 1750 rpm en un 10% a un motor de 6HP, le reduce la potencia en 27%.

2) CONTROLAR EL FLUJO VARIANDO LA VELOCIDAD (RPM)

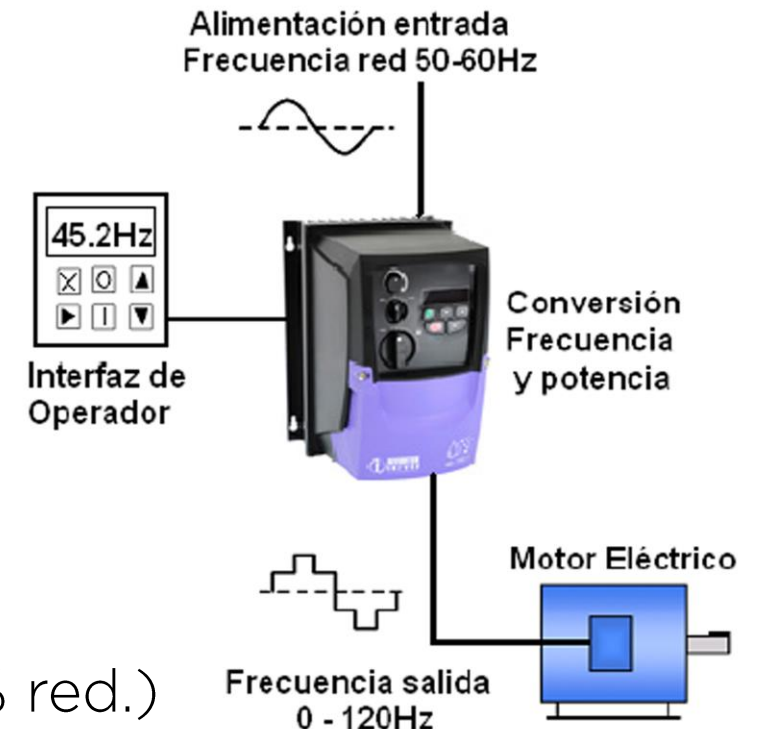


Oportunidades de eficiencia energética

2) CONTROLAR EL FLUJO VARIANDO LA VELOCIDAD (RPM)

Aplicación del variador de frecuencia en el motor (VFD):

- Ajusta la velocidad sobre un rango amplio.
- Reduce el consumo de potencia y energía.
- Produce arranques suaves del motor:
- Reduce costos de mantto. en bomba por:
 - ✓ Menor estrés mecánico (fujo, presión).
 - ✓ Menor riesgo de cavitación.
- Incrementa las pérdidas en el motor (3-5%).
- Introduce armónicos, uso de filtros (hasta 97% red.)



Oportunidades de eficiencia energética

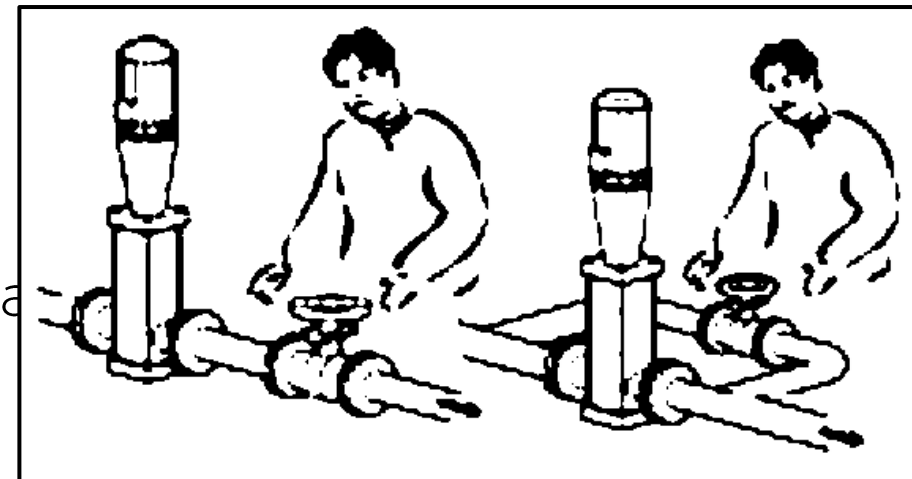
3) ELIMINAR LA VÁLVULA DE CONTROL / BY-PASS

Eliminar la válvula de control:

- Se estrangula la válvula para reducir el flujo.
- Se incrementa la carga.
- Hay vibración: Mayor mantenimiento y menor vida útil de la bomba.

Eliminar el by-pass:

- Usa una línea para retornar parte del flujo a la succión.
- Gasta energía por el retorno del flujo.



Oportunidades de eficiencia energética

4) CONTROL DE ARRANQUE/PARADA DE BOMBA

- Parar la bomba cuando no se necesite.

Ejemplo: Llenado de un tanque.

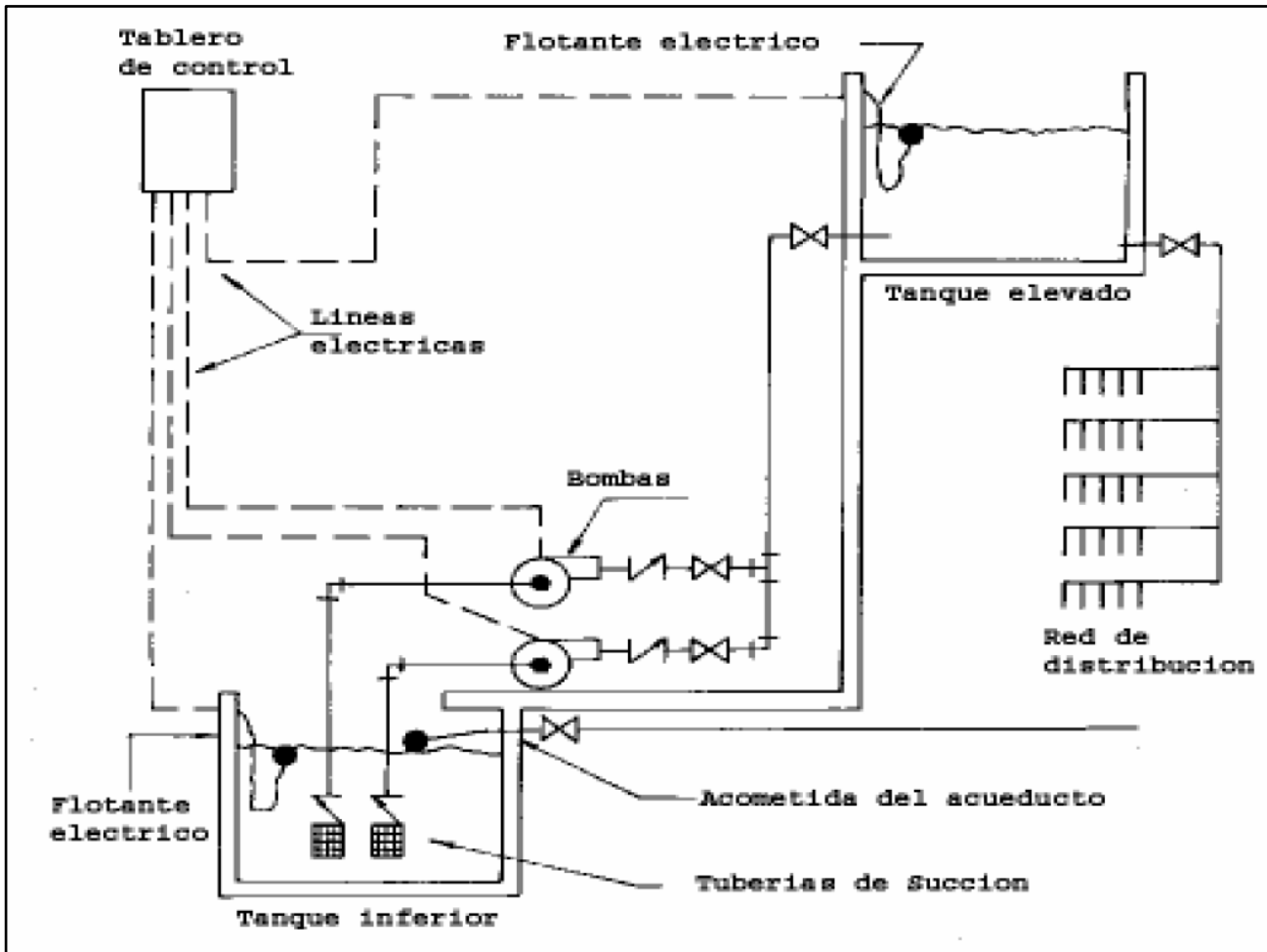
- Adecuado si no se realiza con frecuencia (4 - 6 veces/hora).
- Método para reducir la máxima demanda (bombeo en horas fuera de pico).

- Se requiere tanque elevado o sistema hidroneumático. A veces no hay espacio..

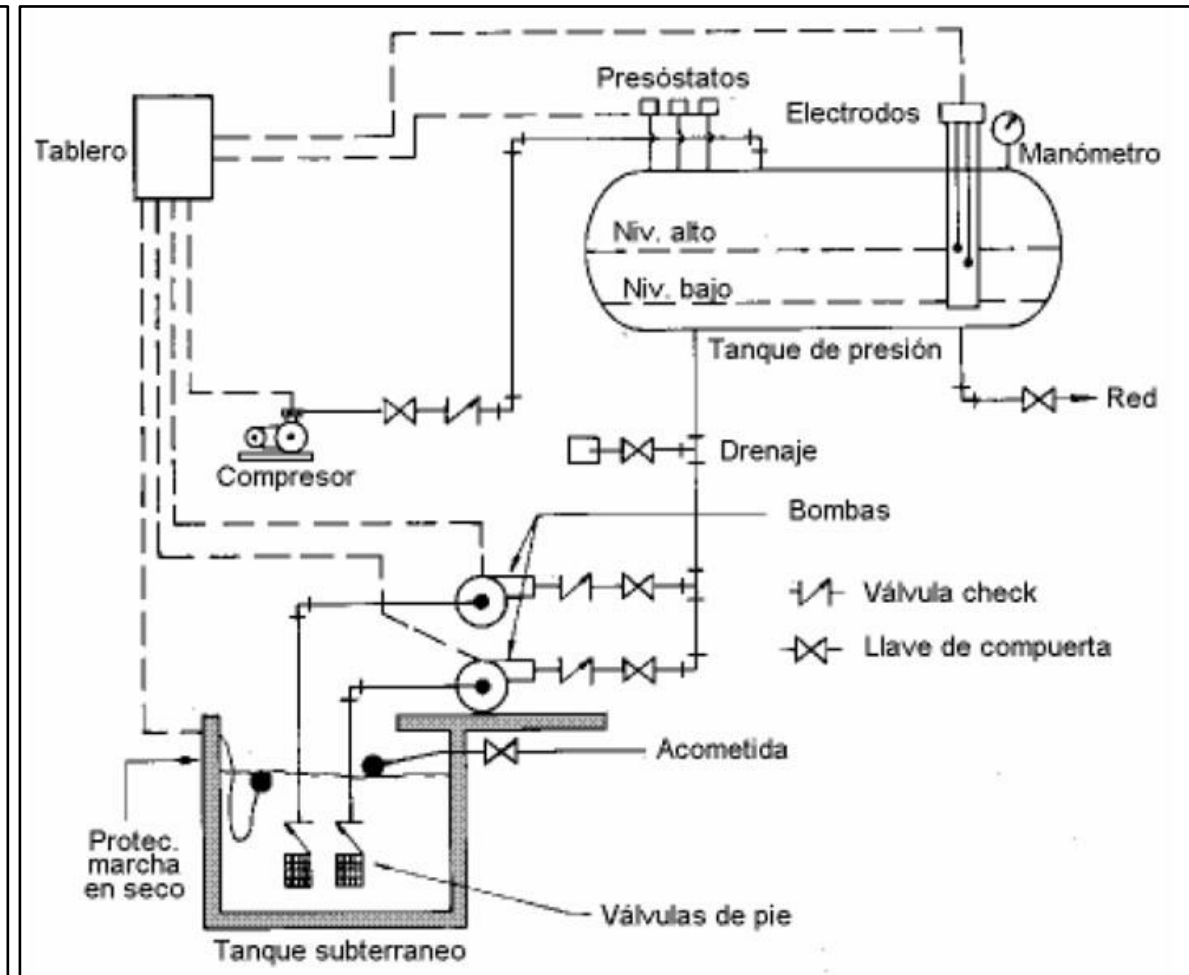


Oportunidades de eficiencia energética

Bomba con tanque elevado



Bomba con tanque hidroneumático



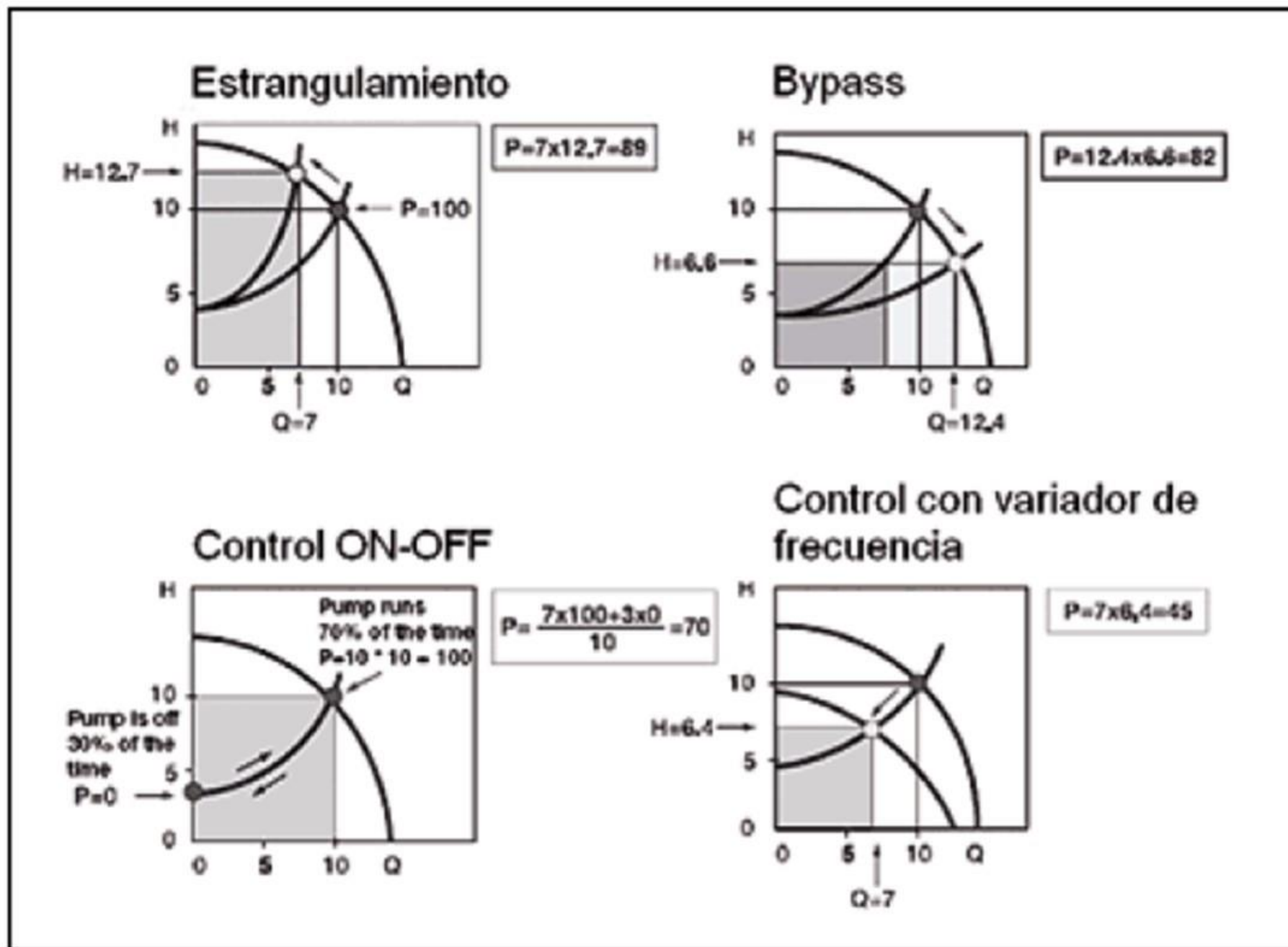
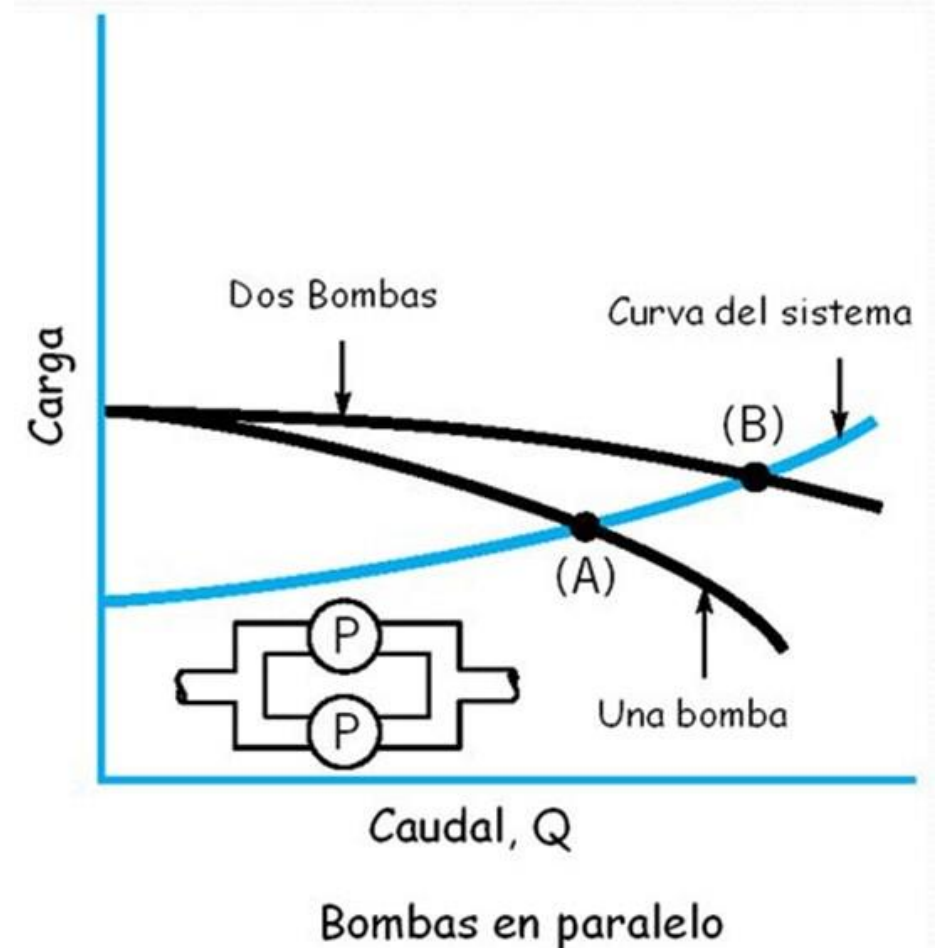


Figura 3: Potencia asociada a cada uno de los métodos de control de flujo.

Oportunidades de eficiencia energética

5) USAR BOMBAS EN PARALELO PARA DEMANDA VARIABLE

- Bombas múltiples: algunas se apagan en baja demanda.
- Se usan cuando la carga estática >50% de carga total.
- La curva del sistema no cambia.
- Caudal menor que la suma de los caudales individuales.



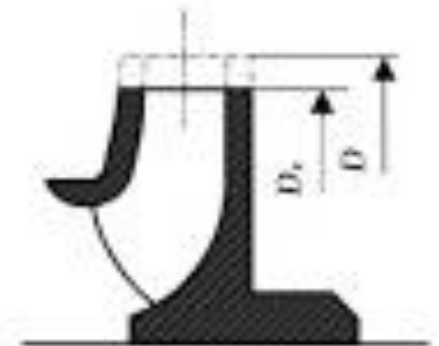
Oportunidades de eficiencia energética

6) RECORTAR EL IMPULSOR DE LA BOMBA

- Aplicación de las leyes de afinidad:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$$

- Es posible reducir el caudal y la potencia.
- Consideraciones:
 - ✓ No usar con caudales variables.
 - ✓ No recortar más del 20% del tamaño.
 - ✓ El recorte debe ser parejo.
 - ✓ Cambiar el impulsor es mejor opción, pero más caro y no siempre posible.



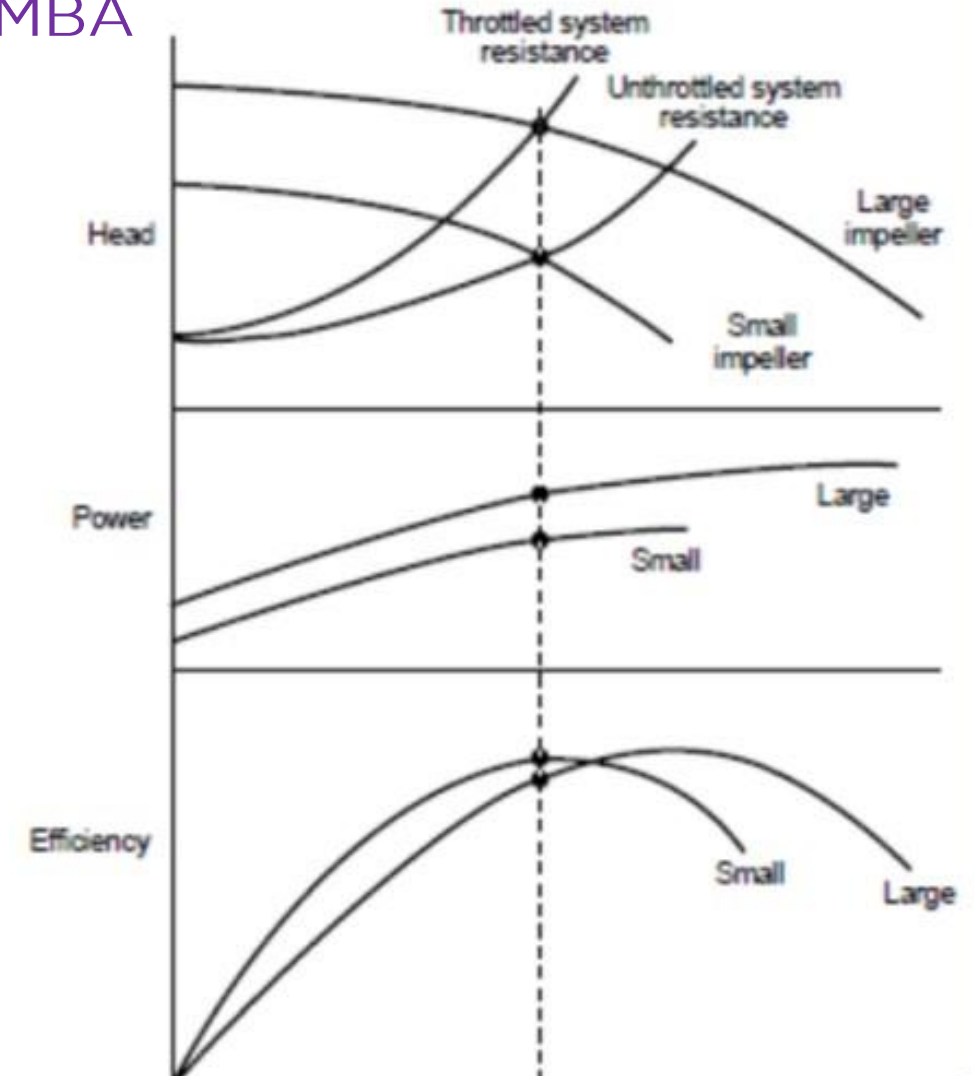
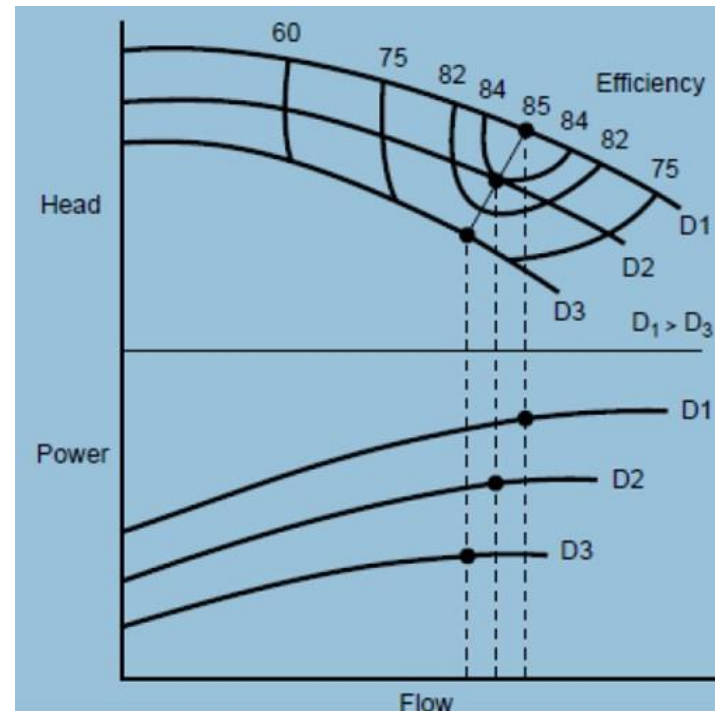
a) Bomba de voluta



Oportunidades de eficiencia energética

6) RECORTAR EL IMPULSOR DE LA BOMBA

- El impulsor será más eficiente cerca del máximo diámetro.
- Un impulsor más pequeño será menos eficiente, pero el ahorro de energía del sistema será mayor.



MODULO 2

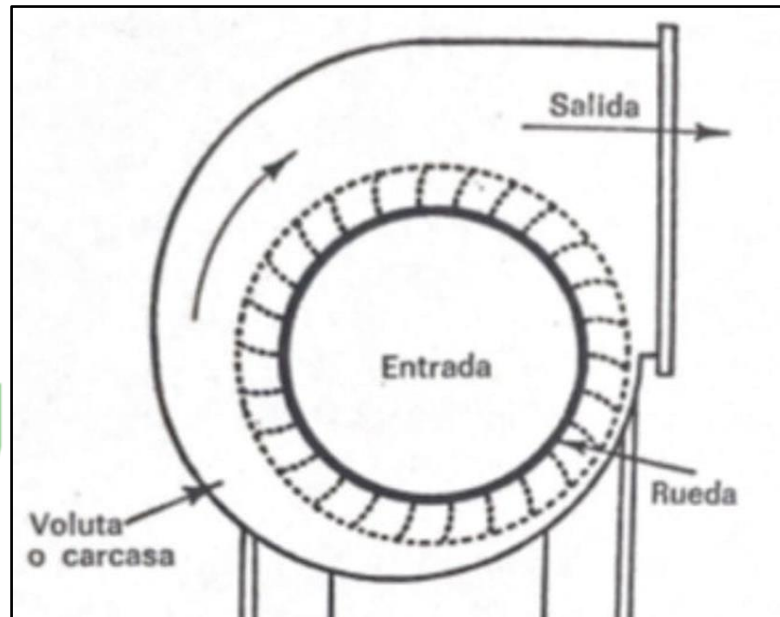
Eficiencia en ventiladores y sopladores

1. Introducción
2. Aplicaciones típicas y eficiencias
3. Velocidad del ventilador y caudal
4. Elevación de la presión estática del ventilador
5. Velocidad vs. potencia
6. Oportunidades de eficiencia energética
7. Preguntas

Introducción

Los ventiladores y sopladores proveen aire para ventilación y procesos industriales.

- En general, los ventiladores operan hasta unos 2 psi.
- Los sopladores entre 2 y 20 psi.
- Los compresores se utilizan para más de 20 psi.



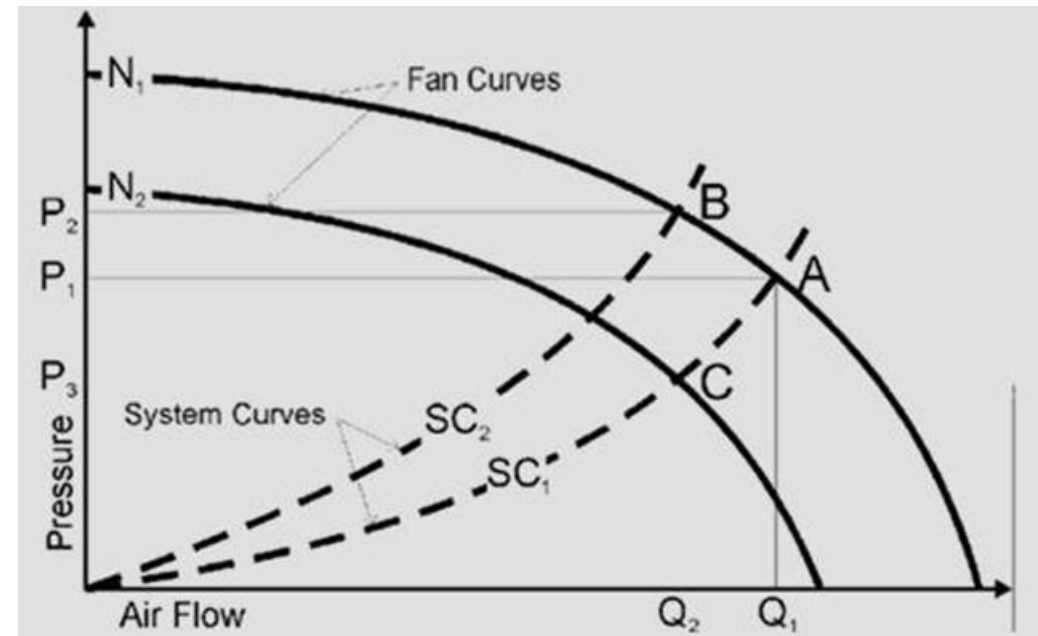
Introducción

- Los ventiladores generan presión para mover el aire contra una resistencia (ductos, dampers, etc.).
- El impulsor recibe energía del eje y lo transmite al aire.
- La energía aparece como presión de velocidad y presión estática. $\text{Presión total} = P.\text{estática} + P.\text{velocidad (dinámica)}$

Nota:

Los catálogos comerciales muestran las curvas en función de la presión estática.

Como norma las curvas son para aire a 20°C y una presión de 760 mmHg



Aplicaciones típicas y eficiencias

La selección de ventiladores y sopladores depende de:

- Caudal y presión requeridos.
- Material manejado.
- Limitaciones de espacio.
- Eficiencia.

Tipo de ventilador	Rango de eficiencia pico (%)
Centrifugo	
Perfil aerodinámico, curvado hacia atrás / inclinado	79–83
Radial modificado	72–79
Radial	69–75
Soplador de presión	58–68
Curvado hacia adelante	60–65
Axial	
Vane-axial	78–85
Tubo-axial	67–72
Hélice	45–50



Aplicaciones típicas

Aplicación	Tipo de ventilador o soplador
Transporte de material con alto ratio aire / material y materiales finos y granulares	Ventiladores radiales inclinados hacia atrás Ventiladores centrífugos
Sistemas de transporte de material con bajo ratio aire / material y materiales propensos a obstruir el sistema de distribución	Sopladores de desplazamiento positivo
Suministro de aire para combustión	Todos los tipos de ventiladores
Calderas de tiro forzado	Ventiladores de hélices, vane-axial inclinados hacia atrás
Aumento de la presión del gas	Sopladores centrífugos
Calderas de tiro inducido	Ventiladores radiales curvados hacia adelante
Escape de horno	Ventiladores radiales
Suministro a horno	Ventiladores de hélices, vane-axial inclinados hacia atrás
Proceso de secado	Ventiladores de hélices, vane-axial, tubo-axial. Sopladores centrífugos
Sistemas de aireación y agitación	Sopladores centrífugos de desplazamiento positivo
Ventilación de la planta y HVAC (limpio)	Ventiladores de hélices, vane-axial, tubo-axial. Propulsores.



Velocidad del ventilador y caudal

El flujo de aire a través del ventilador depende de la velocidad de rotación del impulsor o rodete (RPM). Ejemplo:

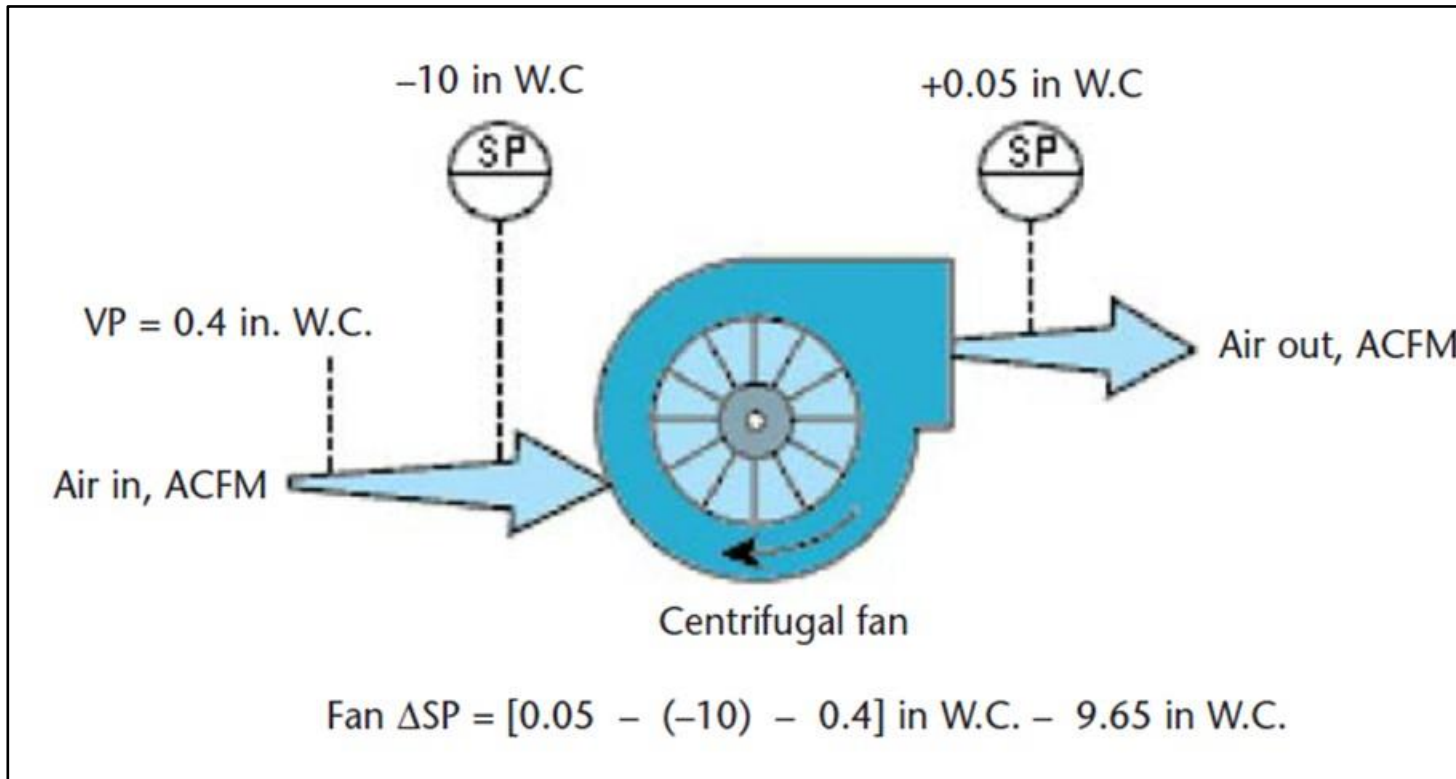
Velocidad rodete (rpm)	Flujo de aire (actual <u>cubic feet per minute</u> — ACFM)
800	16 000
900	18 000
1 000	20 000
1 100	22 000
1 200	24 000

$$Q_2 = Q_1 \left[\frac{\text{rpm}_2}{\text{rpm}_1} \right]$$



Elevación de la presión estática del ventilador

El aire al pasar por el ventilador sufre una elevación de su presión estática por efecto de la energía mecánica dada por el rodete.



También:

$$Fan \Delta Sp_2 = Fan \Delta SP_1 \left[\frac{rpm_2}{rpm_1} \right]^2$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left[\frac{rpm_2}{rpm_1} \right]^3$$

$$Fan Sp\Delta = SP_{(Fan outlet)} - Sp_{Fan inlet} - VP_{(fan inlet)}$$

Oportunidades de eficiencia energética

1) MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL VENTILADOR

$$\text{Fan efficiency} = \frac{\text{Air kW}}{\eta_m \times \text{input kW}} \times 100$$

$$\text{Air kW} = \frac{\left[\left(\frac{\text{Flow in TPH} \times 1000}{3600} \right) \frac{\text{kg}}{\text{Sec}} \times \left(\frac{\text{mmWC}}{1000} \right) \text{mWC} \times \left(\frac{100 \text{kg/m}^3}{\rho_a} \right) \times (9.81 \text{m/sec}^2) \right]}{1000}$$

Where: ρ_a = density of air at measured temp. (kg/m^3)

η_m = efficiency of motor (0.85 for small kW motors, 0.9 for large kW motors and 0.95 for HT motors)

Input kW = AC input power to motor terminals



Oportunidades de eficiencia energética

1) MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL VENTILADOR

Cuando la eficiencia del ventilador es baja:

- Evaluar el reemplazo del ventilador por otro más eficiente.
- Cambio del impulsor por un diseño mejorado. P.ej. cambio de alabes radiales a alabes rectos curvados hacia atrás.
- Si la eficiencia es baja porque el ventilador no se acopla al sistema (sobre diseño), entonces:
 - ✓ Reducir RPM del ventilador (cambio polea ó VFD).
 - ✓ Reemplazar el impulsor por otro más pequeño.
 - ✓ Recortar el diámetro del impulsor.



Oportunidades de eficiencia energética

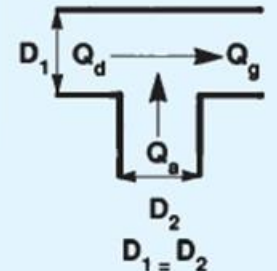
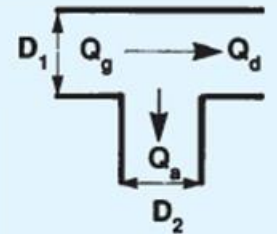
2) MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA

Si hay que mejorar la eficiencia del sistema, entonces se tiene que evaluar la ducteria:

- Pérdidas por fugas / infiltraciones.
- Reducir las pérdidas de presión en codos, reducciones, bifurcaciones y juntas, mediante rediseño.
- Acumulación de material.

SEPARACION Y UNION DE CAUDALES

Q_a/Q_g	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Separación						
n_a	0,96	0,88	0,89	0,96	1,1	1,29
n_d	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
Unión						
n_a	-1,2	-0,4	0,1	0,47	0,73	0,92
n_d	0,06	0,18	0,3	0,4	0,5	0,6



Q_a/Q_g	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Separación						
n_a	0,9	0,66	0,47	0,33	0,29	0,35
n_d	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,2	0,33
Unión						
n_a	-0,9	-0,37	0	0,22	0,37	0,38
n_d	0,05	0,17	0,18	0,05	-0,20	-0,57

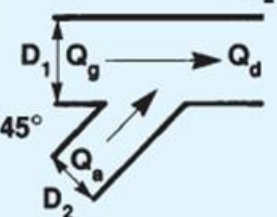
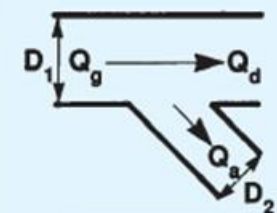


Fig. 6

Oportunidades de eficiencia energética

3) REDUCIR PERDIDAS POR DAMPERS

- El estrangulamiento por dampers es muy común para controlar el flujo de aire.
 - Ofrece resistencia al flujo y consume mucha energía como pérdida de carga.
 - Hay otros métodos mejores para regular el flujo
-
- ✓ Paletas guía de entrada (persianas).
 - ✓ Acoplamientos entre el motor y ventilador.
 - ✓ Variadores de frecuencia (VFD). Es el más eficiente.



Muchas gracias.

**Unidad de Gestión del
Proyecto**



Zonas Industriales Sostenibles