



**PROGRAMA INTEGRAL DE “ASISTENCIA TÉCNICA Y CAPACITACIÓN PARA LA FORMACIÓN DE ESPECIALISTAS EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE GUATEMALA”**

**CURSO – TALLER  
PROMOTORES DE AHORRO Y EFICIENCIA DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA**

**MÓDULO VII: AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE BOMBEO**



*Guatemala, Guatemala*

---

---

*1 – 5 / Marzo / 2010*



## 7. AHORRO DE ENERGIA EN SISTEMAS DE BOMBEO

Es importante conocer las condiciones de operación de la bomba para poder establecer las oportunidades de ahorro que puedan aplicarse, como pueden ser:

- Recorte de impulsor de la bomba para mejorar su punto de operación.
- Sustitución por una bomba de mayor eficiencia (o un arreglo de bombas).
- Aplicación de convertidor de frecuencia en el sistema de bombeo.
- Disminución de pérdidas en el sistema de bombeo.
- Instalación de equipos de control.
- Administración del Bombeo y Aprovechamiento de tarifas horarias.
- Eliminar la operación de la bomba con cavitación.

### Operación del Sistema.

La operación del sistema queda definida al determinar:

- La curva del sistema.
- El punto o puntos de operación de la bomba.
- La eficiencia de la bomba.
- La potencia al freno o absorbida por la bomba
- El NPSH (carga neta de succión positiva) disponible
- La potencia entregada por el motor
- El consumo de energía
- Los costos de operación

Una vez bien establecidos estos parámetros se podrán definir las oportunidades de ahorro que son susceptibles de aplicar.

### Procedimiento de Calculo.

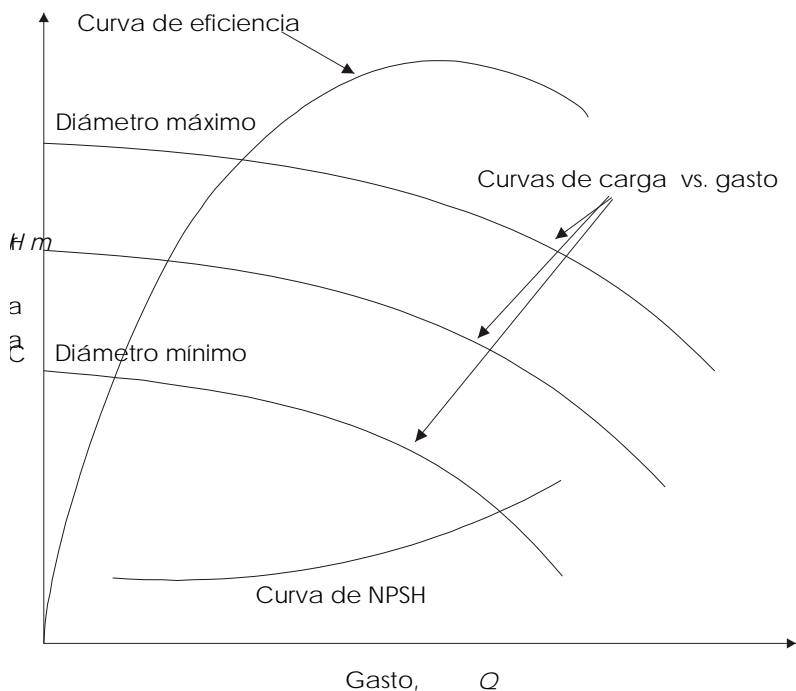
#### a- Obtener la Curva Característica de la Bomba.

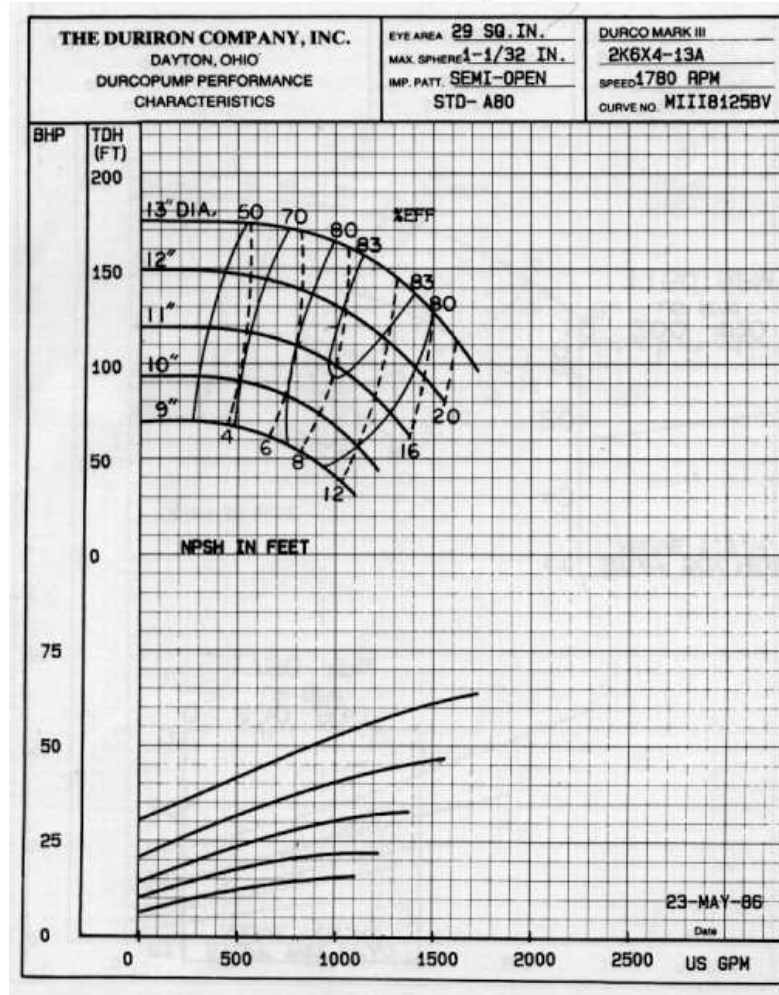
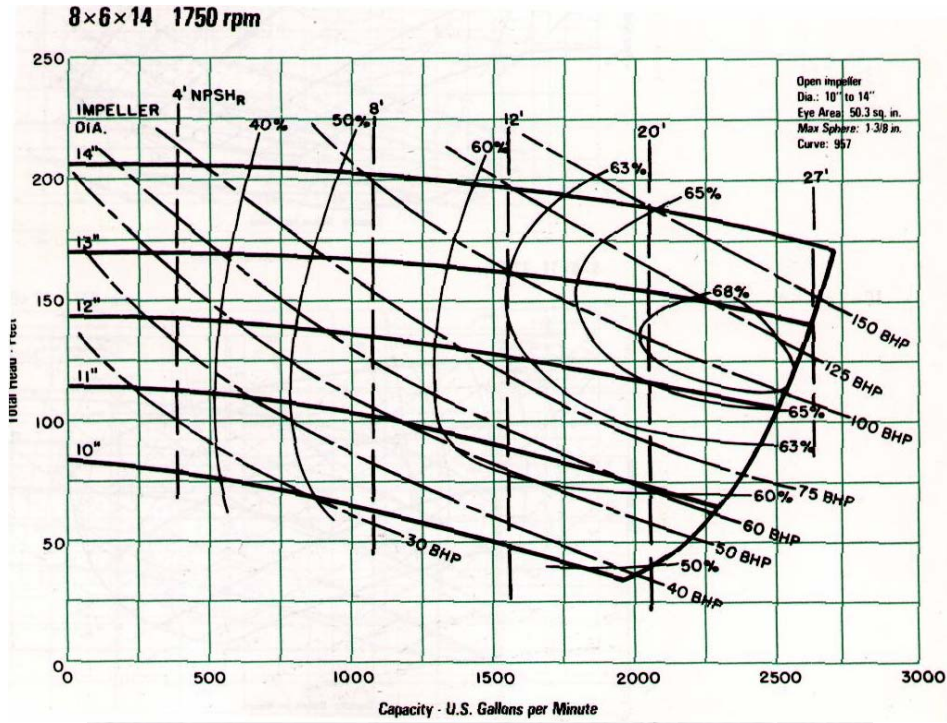
Las curvas características de la bomba son similares de un fabricante a otro, todas presentan información semejante, en general incluyen:

- La curva de carga – gasto. Trazada para diferente diámetro de impulsor y a velocidad constante.
- La curva de NPSH – gasto.
- La curva de eficiencia – gasto. O curvas de iso eficiencia.

La curva de potencia – gasto.

En caso de que la base de datos no incluya la bomba que se desea evaluar, se podrán utilizar curvas de referencia por tamaño de bomba.





Curva característica de una bomba.



**b- Construir la curva del sistema.**

La curva del sistema queda definida por la carga estática total y las pérdidas de presión en el sistema de bombeo.

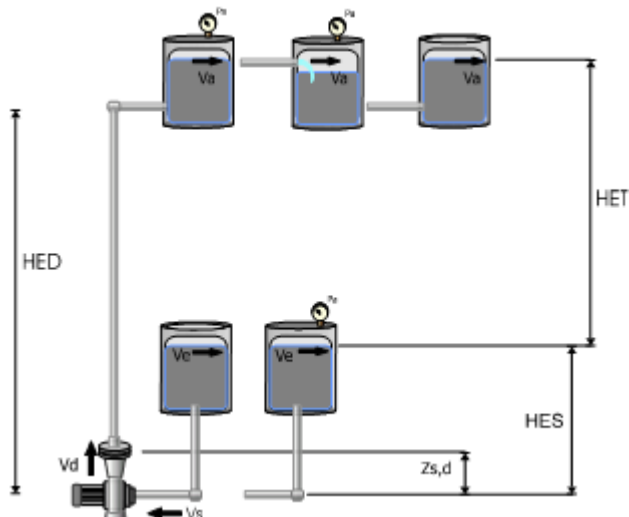
**Cálculo de la carga estática total.**

La carga estática total se determina conociendo la altura geométrica entre el nivel de líquido en los recipientes de succión y descarga con respecto a la línea de centros de la bomba y las presiones en estos mismos puntos. Cuando la descarga sea libre, como la mostrada en el deposito intermedio de la figura de abajo, la altura a considerar será la de la tubería.

Para el cálculo se empleará la siguiente relación:

$$A) \quad H_{ET} = H_{GD} - H_{GS} + \frac{P_D - P_s}{\gamma}$$

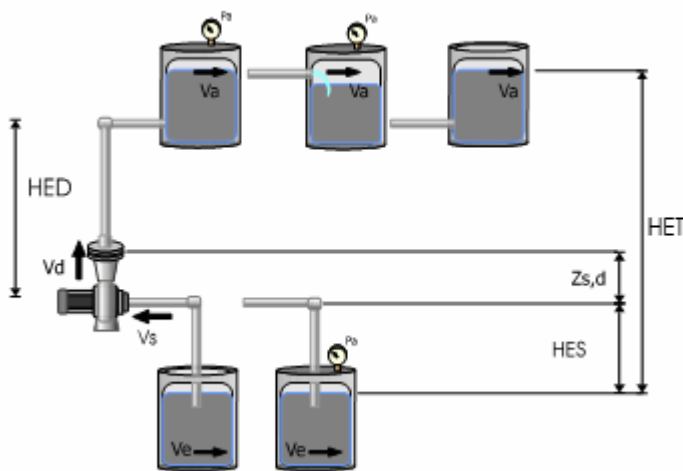
Esta expresión es valida cuando el nivel del liquido en la succión esta por arriba de la línea de centros de la bomba, (succión positiva o ahogada).



Sistemas de bombeo con succión positiva

$$B) \quad H_{ET} = H_{GD} + H_{GS} + \frac{P_D - P_s}{\gamma}$$

Expresión utilizada cuando el nivel del liquido en la succión esta por abajo de la línea de centros de la bomba.



Sistemas de bombeo con succión negativa



donde:

$H_{ET}$ : Carga estática total.

$H_{GD}$ : **Altura geométrica de descarga**

$H_{GS}$ : **Altura geométrica de succión**

$P_D$ : Presión en el recipiente de descarga

$P_S$ : Presión en el recipiente de succión

$\gamma$ : Peso específico del fluido

$V_D$ : Velocidad en la tubería de descarga.

$V_S$ : Velocidad en la tubería de succión.

### Cálculo de las pérdidas de presión en la red de tuberías.

Las pérdidas de presión en succión y descarga pueden determinarse por:

A. Método de estimación de pérdidas mediante uso de manómetros

Una forma práctica de estimar las pérdidas es a través de mediciones en campo, instalando manómetros por ejemplo:

En la descarga de la bomba (inmediatamente después de la brida) y al final de la línea de suministro  
Antes y después de un equipo o accesorio

B. Método de cálculo mediante el conocimiento completo de la instalación bombeo

Las pérdidas de carga se originan por la fricción del fluido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes como pueden ser intercambiadores de calor. Estas pérdidas varían proporcionalmente con el cuadrado del flujo del sistema. También varían de acuerdo con el tamaño, tipo y condiciones de las superficies de tubos y accesorios y las características del líquido bombeado.

En el cálculo de las pérdidas en tuberías se consideran todas las características del sistema de bombeo:

- Gasto o gastos de operación
- Características del fluido
- Características de tuberías y accesorios

Las pérdidas de carga en tuberías se determinan mediante la ecuación de Darcy - Weisbach:

$$h_L = \frac{fLv^2}{2Dg} = \frac{8fLQ^2}{D^5g\pi^2}$$

donde

$h_L$  = pérdida de carga (m),

$D$  = es el diámetro de la tubería (m),

$L$  = longitud de la tubería (m),

$v$  = velocidad del fluido (m/s),  $v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ),

$f$  = factor de fricción (adimensional),

El Factor de fricción es función de la rugosidad del material, diámetro de la tubería y del número de Reynolds, este último se define como:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} = \frac{Dv}{\gamma}$$

donde  $D$  = es el diámetro de la tubería (m),

$v$  = velocidad del fluido (m/s),

$\rho$  = densidad ( $kg/m^3$ )

$\mu$  = viscosidad del fluido (cps)





El factor de fricción se puede determinar mediante diferentes relaciones experimentales o mediante el diagrama de Moody, el procedimiento para determinar el factor de fricción en esta metodología se divide en dos rangos principales de operación: Flujo laminar y flujo turbulento.

El flujo laminar se considera cuando se presenta un número de Reynolds menor que 2300, es decir.

$$\text{Re} < 2300$$

Para este régimen de flujo se calcula el factor de fricción para tuberías lisas y rugosas, utilizando la ecuación de Poiseuille:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

En el caso de flujo turbulento, para  $\text{Re} > 2300$ , se determina el factor de fricción mediante tres relaciones muy utilizadas: Colebrook y Nikuradse, a continuación se presentan estas relaciones así como el rango de aplicación:

- a) La relación de Colebrook es implícita y para resolverla se utilizará el método numérico (iteración de punto fijo).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right]^{-2}$$

Rango de aplicación:  $65 < \text{Re} \times \varepsilon/D < 1300$

- b) Relación de Nikuradse (para tuberías rugosas).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{\varepsilon/D} \right) + 1.14$$

Rango de aplicación:  $\text{Re} \times \varepsilon/D > 1300$

- c) Relación de Nikuradse (para tuberías lisas).

$$f = 0.0032 + 0.221 \cdot x \cdot \text{Re}^{-0.237}$$

Rango de aplicación:  $\text{Re} \times \varepsilon/D < 65$  y  $10^5 < \text{Re} < 5 \times 10^6$

### Cálculo de pérdidas de carga en accesorios.

Estas se determinan mediante la siguiente expresión:

$$h_A = \frac{k \cdot v^2}{2g} = \frac{8 \cdot k \cdot Q^2}{D^4 g \pi^2}$$

$v$  = velocidad del fluido (m/s),

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

$D$  = diámetro de la tubería (m),

$g$  = aceleración de la gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ ),

$k$  = coeficiente de resistencia (adimensional),

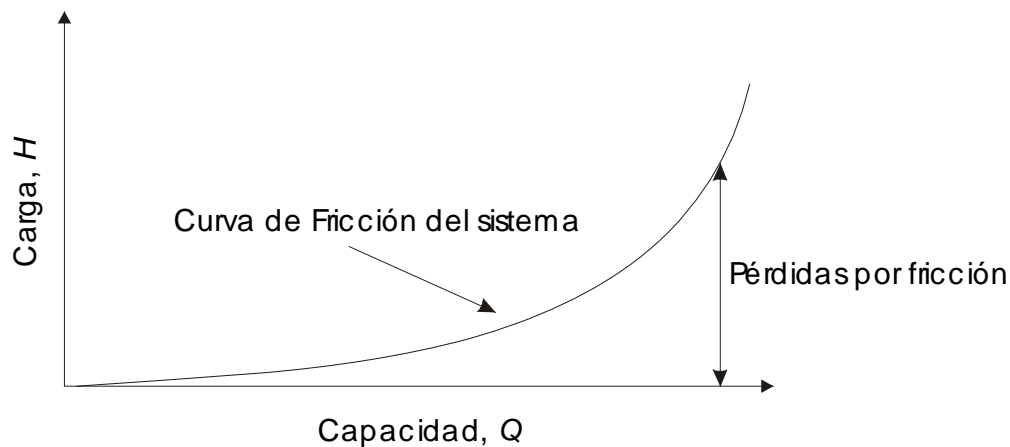
El factor  $K$  es adimensional y su valor depende del tipo de accesorio y diámetro del mismo, se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio.



### Elaboración de la curva del sistema.

Una vez determinada la pérdida de fricción en tuberías se suma a las pérdidas por accesorios y se construye la curva de perdidas por fricción.

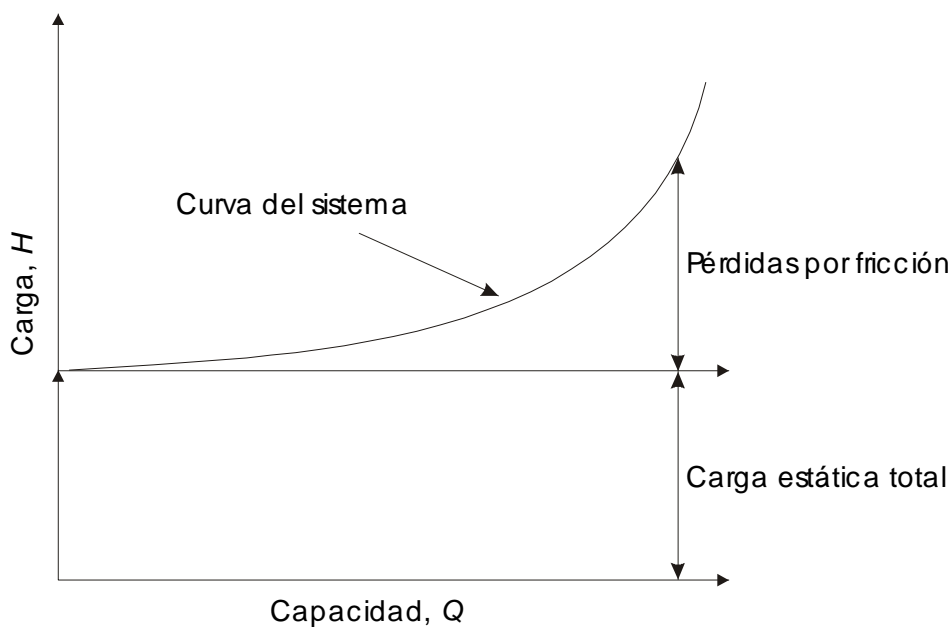
$$H_f \text{ (perdida total por fricción)} = H_L \text{ (perdida por fricción en tuberías)} + H_A \text{ (perdida por fricción en accesorios)}$$



La curva del sistema incluye la carga estática y la carga dinámica.

$$\text{Carga total del sistema} = H_{\text{(estática)}} + H_{\text{(Dinámica)}}$$

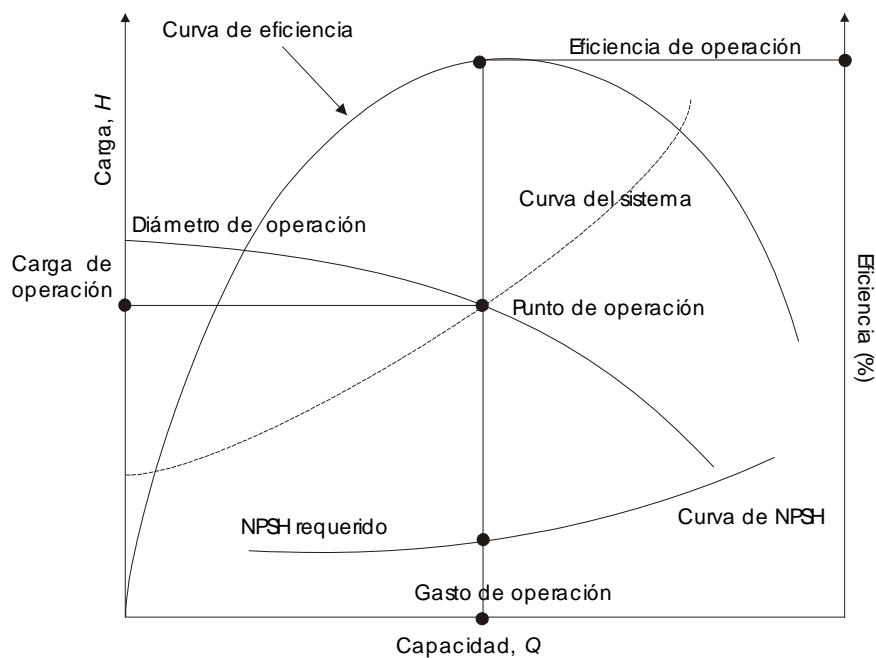
$$H_T = H_{ED} \pm H_{ES} + \frac{P_d - P_s}{\gamma} + \frac{V_D^2 - V_S^2}{2g} + \sum \left[ \frac{fLv^2}{2Dg} \right] i + \sum \left[ \frac{k \cdot v^2}{2g} \right] i$$





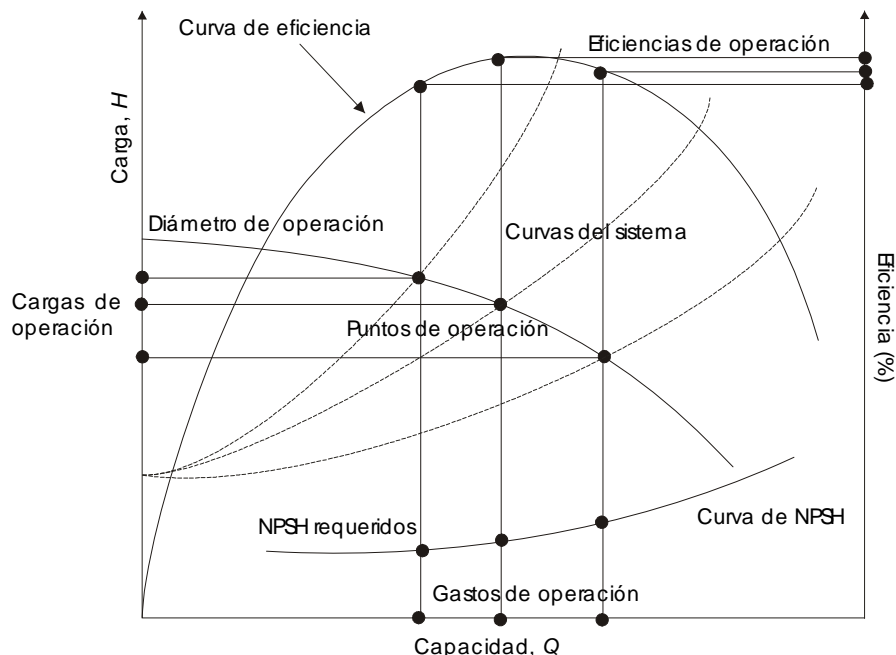
### c- Determinar el punto o puntos de operación de la bomba.

En la intersección de la curva de la bomba correspondiente al diámetro de operación y la del sistema se obtiene el punto de operación real. Al trazar una línea horizontal y otra vertical que pase por este punto pueden obtenerse los valores de carga, gasto, eficiencia, NPSH requerido y potencia.



Cuando se presentan diferentes condiciones de operación, deben obtenerse los diferentes puntos de operación de la bomba.





De las gráficas anteriores se determina perfectamente el punto o puntos de operación de la bomba, obteniendo el valor de la eficiencia, el NPSH requerido y la potencia absorbida.

**Determinación alternativa de la Eficiencia.**

En caso de no contar con las curvas características de la bomba, se puede determinar la eficiencia de la bomba mediante el siguiente procedimiento.

Primero determine la potencia entregada en la flecha de la bomba (potencia absorbida), mediante la ecuación:

$$BHP = \text{Potencia medida en el motor} \times \eta_{\text{motor}} \quad * \quad (\text{HP o kW})$$

\* Consultar metodología de motores eléctricos.

Enseguida establezca la potencia hidráulica de la bomba mediante la siguiente expresión.

$$\text{Potencia hidráulica} = \frac{QH\rho g}{1000} \quad (\text{kW})$$

donde

- Q = gasto (m<sup>3</sup>/s),
- H = carga total (m),
- ρ = densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>),
- g = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

La eficiencia de una Bomba queda definida como:

$$\eta_{\text{Bomba}} = \frac{QH\rho g}{(BHP)} = \frac{\text{Potencia hidráulica}}{\text{Potencia absorbida por la bomba}}$$

Calculo del consumo de energía y costos de operación.

Potencia demandada (kW) = Potencia del motor de la Bomba.

Consumo de energía kWh = kW que demanda x horas de operación



En tarifas horarias.

Consumo de energía base kWh = kW que demanda x horas base de operación

Consumo de energía intermedio kWh = kW que demanda x horas intermedia de operación

Consumo de energía punta kWh = kW que demanda x horas punta de operación

### **Costo de operación.**

Finalmente se determinan los costos de operación considerando los siguientes parámetros y expresiones:

- La tarifa aplicada en la empresa,
- Costo demanda: \$/kW.
- Costo energía: \$/kWh.

Por tanto,

**Costo por demanda** = kW en demanda x Costo del kW

**Para tarifas ordinarias:**

**Costo por energía** = Consumo de energía anual x Costo de energía

**Para tarifas horarias:**

**Costo econ. por energía** = (Costo energía horas base x Costo kWh en base +  
Costo energía horas punta x Costo kWh en intermedia +  
Costo energía horas punta x Costo kWh en punta)

**Costo total de operación** = costo por demanda + costo por energía

### **Sustitución de una Bomba por otra que opere a mayor eficiencia.**

Objetivo.

Esta medida permite evaluar los ahorros asociados a la sustitución de bombas centrífugas que operan con baja eficiencia por bombas que operen con mayor eficiencia.

Justificación.

La mayor parte de las bombas centrífugas en operación trabajan a baja eficiencia, por diversas circunstancias, entre las que se destacan:

Una selección para una carga y gasto que en la operación real no se da.

Por que las condiciones de operación cambiaron.

Por una mala selección.

Por una sustitución inadecuada.

Etc.



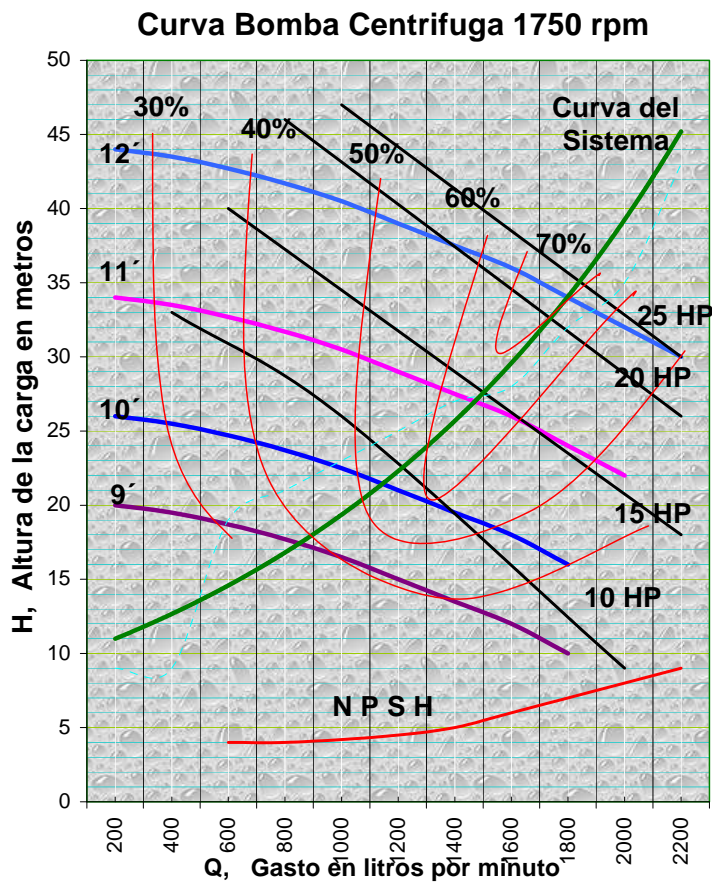
## Procedimiento.

Sobre la base de que la bomba actual opera a baja eficiencia (menor al 50%), se recuperan de la etapa 3.

- Las curvas características de la bomba y la curva o curvas del sistema.
- El punto o puntos de operación de la bomba (carga vs. gasto)
- Eficiencia
- Potencia al freno o absorbida por la bomba
- NPSH disponible
- Curva del sistema
- Potencia entregada por el motor
- Consumo de energía
- Costos de operación

## Selección de la Bomba que sustituye a la actual.

Se hace una búsqueda de entre diversas bombas para seleccionar la que favorezca la operación en mayor eficiencia. Se sobrepone la curva del sistema sobre las curvas de las bombas seleccionadas y se escoge aquella que de acuerdo a la velocidad, carga, gasto, NPSH, tamaño y diámetro de impulsor opera en mejores condiciones de eficiencia.



La selección debe cumplir las mismas condiciones de velocidad, gasto y carga.



La sustitución se justifica por que la nueva bomba trabajará con una eficiencia mayor que la actual, entonces solicitara del motor eléctrico una potencia en la flecha de:

$$BHP = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta_{\text{nueva-bomba}}}$$

### Calculo de los ahorros en potencia y energía eléctrica.

El motor eléctrico solicitará a la red eléctrica una potencia determinada por.

$$\text{Potencia de entrada motor} = \frac{BHP}{\eta_{\text{motor}}}$$

La diferencia determina en potencias determina el ahorro:

$$\text{Ahorro en demanda (kW)} = \text{Potencia actual} - \text{Potencia propuesta}$$

Posteriormente se determina el ahorro de energía al multiplicar el ahorro de potencia por la duración del sistema en operación.

$$\text{Ahorro de energía (kWh)} = \text{Ahorro en kW} \times \text{Tiempo de operación.}$$

En tarifas horarias.

$$\text{Ahorro de energía base kWh} = \text{kW de ahorro} \times \text{horas base de operación}$$

$$\text{Ahorro de energía intermedio kWh} = \text{kW de ahorro} \times \text{horas intermedia de operación}$$

$$\text{Ahorro de energía punta kWh} = \text{kW de ahorro} \times \text{horas punta de operación}$$

$$\text{Ahorros monetarios por demanda} = \text{Ahorro en demanda} \times \text{Costo del kW}$$

$$\text{Ahorros monetarios por energía} = \text{Ahorro en energía anual} \times \text{Costo de energía}$$

$$\text{Ahorro monetarios por energía} = (\text{Ahorro energía base} \times \text{Costo kWh en base} + \text{Ahorro energía punta} \times \text{Costo kWh en intermedia} + \text{Ahorro energía punta} \times \text{Costo kWh en punta})$$

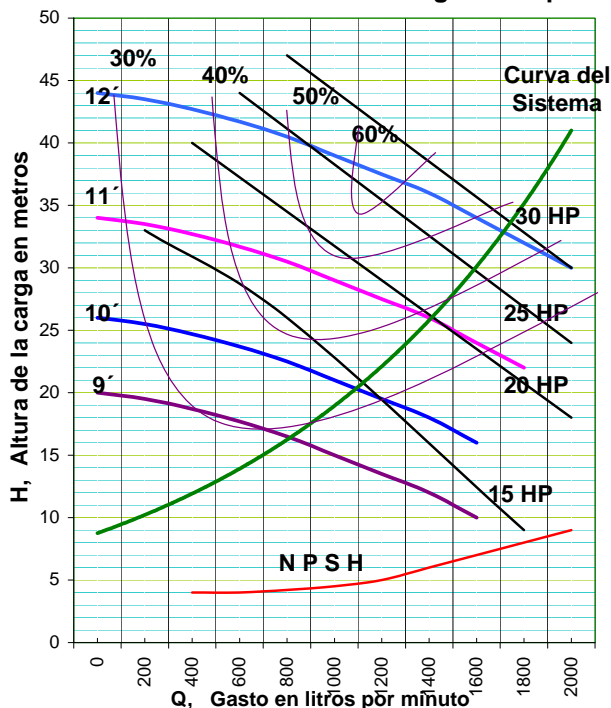
$$\text{Ahorros totales anuales} = \text{Ahorros econ. demanda} + \text{Ahorros econ. Energía}$$

### Ejemplo.

Se tiene una bomba que descarga 1800 litros por minuto y con una carga de 33 metros, la potencia del motor eléctrico es 30 HP. Tamaño 4x3x12.



Curva Bomba Inicial Centrifuga 1750 rpm



$$H = \frac{33 * 10,000}{1.02108} = 323,187 \frac{N}{m^2} \quad Q = \frac{1800}{60 * 1000} = 0.03 \text{ m}^3 / \text{s}$$

La potencia (tomando agua  $\gamma_e = 1$ ) de salida es

$$P = \frac{323,187 * 0.03}{1000} = 9.7 \text{ kW}$$

Si la eficiencia es como la que se indica de 48%, entonces a la bomba entra una potencia mecánica de

$$P_{\text{entrabomba}} = \frac{9.7}{0.48} = 20.2 \text{ kW} = 27 \text{ HP}$$

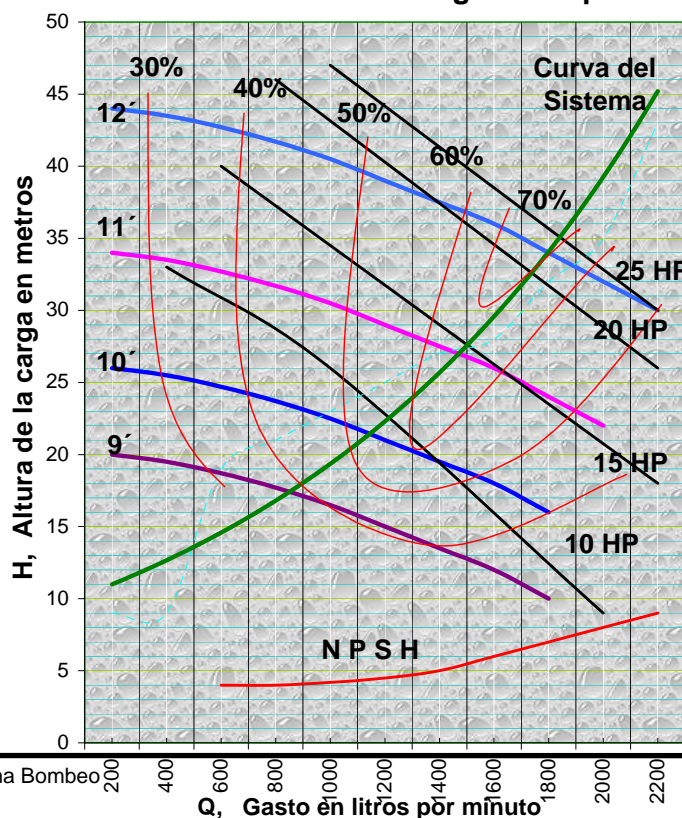
Suponiendo una eficiencia del motor de 85%, la medición eléctrica es aproximadamente:

$$P_{\text{motor}} = \frac{20.2}{0.85} = 23.7 \text{ kW} = 31.7 \text{ HP}$$

Sustitución por otra bomba que opere en el rango de alta eficiencia.

Se selecciona una bomba cuya curva es la siguiente, obsérvese que la curva del sistema entra al rango de mayor eficiencia.

Curva Bomba Centrifuga 1750 rpm





Con las mismas condiciones de caudal y carga, 1800 litros por minuto y 33 metros, respectivamente, la potencia de salida será la misma que en caso anterior es decir 9.7 kW.

La sustitución se justifica por que la nueva bomba trabaja con una eficiencia del 70%, entonces ahora solicitara del motor eléctrico una potencia de:

$$P_{\text{entra bomba}} = \frac{9.7}{0.7} = 13.85 \text{ kW} = 18.5 \text{ HP}$$

La potencia que demandará el motor eléctrico, suponiendo otra vez una eficiencia del 85% será:

$$P_{\text{motor}} = \frac{13.85}{0.85} = 16.3 \text{ kW} = 21.8 \text{ HP}$$

El ahorro de potencia eléctrica es entonces de:

$$\text{Ahorro} = 23.7 \text{ kW} - 16.3 \text{ kW} = 7.4 \text{ kW}$$

Luego esta cantidad puede multiplicarse por las horas de operación para obtener el ahorro en consumo de energía. Posteriormente con los precios unitarios de la energía podrán obtenerse los ahorros económicos.