

## 6. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS ROTODINÁMICAS

### 6.1. GENERALIDADES

Las características más relevantes que permiten definir el comportamiento hidráulico de una bomba, tales como  $Q$ ,  $H$ ,  $P_a$ ,  $\eta$ ,  $n$ ,  $n_s$  y  $NPSH_{req}$ , pueden variar de un tipo de bomba a otro y, para una misma bomba, de un punto de operación a otro. Las distintas variaciones y la relación entre las citadas características, suelen representarse gráficamente y, en conjunto, reciben el nombre de Curvas Características.

Ahora bien, ¿cuáles serán los valores de las características de la bomba,  $H$ ,  $P_a$ ,  $\eta$ ,  $NPSH_{req}$  cuando el caudal,  $Q$ , varía?. Las fórmulas de semejanza no resuelven este interrogante, porque ellas se basan en la hipótesis de que la eficiencia se mantenga constante. Luego, sus resultados serán tanto menos aproximados, cuanto más diferentes sean las condiciones de funcionamiento.

Las curvas características, que son la respuesta a la pregunta anterior, representan los resultados experimentales, fácilmente obtenidos en un banco de pruebas, en un Laboratorio de Hidráulica Aplicada.

### 6.2. BANCOS DE ENSAYO DE BOMBAS ROTODINÁMICAS

Los ensayos de las bombas y la obtención de sus curvas características, en los laboratorios de hidráulica, se llevan a cabo en bancos de prueba, como el mostrado en la Figura 6.1. En dicha figura se muestran los elementos requeridos para la realización de los ensayos, y son:

- Motor de accionamiento a velocidad variable. Se puede utilizar un motor de corriente continua, un motor de corriente alterna con transmisión hidráulica o mecánica, o un motor de combustión interna.
- Medidor de par. Se utiliza un torsiómetro o un motor de corriente continua basculante, el cual se mide el par de reacción,  $M$ , con una balanza.

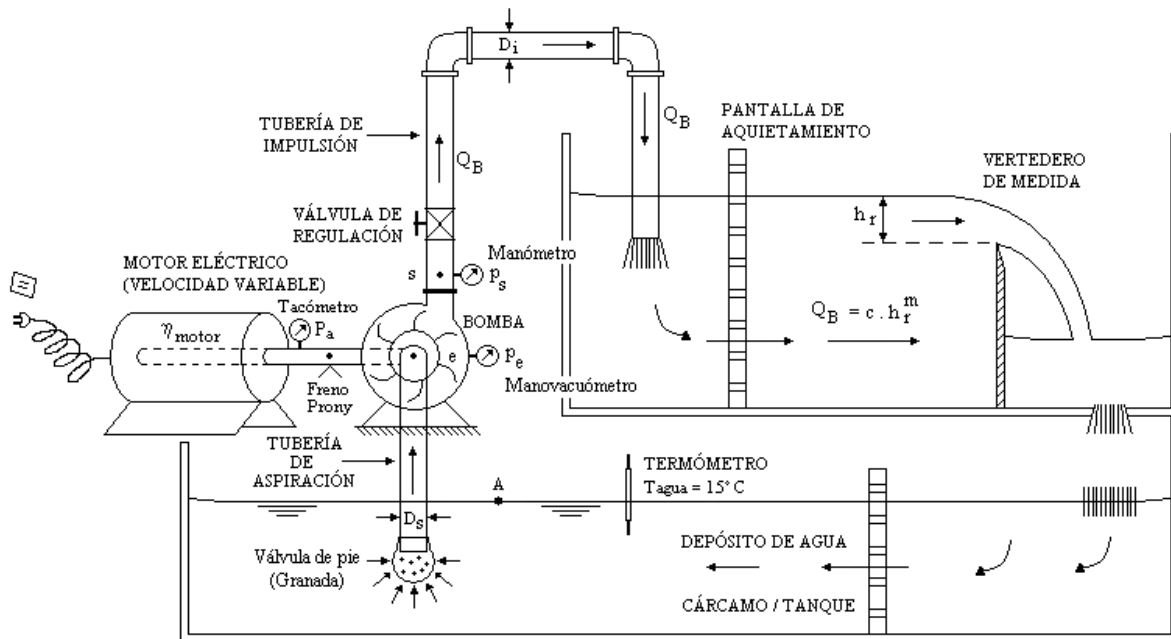


Figura No. 6.1 Esquema de un banco de pruebas de bombas rotodinámicas

- Cuentarrevoluciones para medir  $n$ . Con el par  $M$  y el número de rpm, se calcula  $P_a$ .

$$P_a = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2 \pi n r}{60} = M \cdot \frac{2 \pi n}{60} \cdot \frac{D}{2} = \frac{\pi D}{60} \cdot M \cdot n_{(rpm)}$$

- Manómetro y vacuómetro a la salida y entrada de la bomba, respectivamente, para medir la diferencia de presiones, necesaria para el cálculo de  $H$ .
- Medidor de caudal. Los procedimientos más usuales son: tanques volumétricos (medición de caudal por volumen), tanques gravimétricos (medición de caudal por peso), venturímetros, toberas y diafragmas, rotámetros, etc.
- Termómetro, para medir la temperatura del agua en los ensayos de cavitación.

En los ensayos de cavitación es necesario variar la altura de aspiración, lo que se consigue:

- Estrangulando la válvula de aspiración.
- Aspirando la bomba desde un depósito hermético, en el cual se puede controlar la presión.
- Succionando la bomba desde un pozo, a presión atmosférica, de nivel regulable.

### 6.3. ENSAYO ELEMENTAL DE UNA BOMBA ROTODINÁMICA

Es aquel en que, manteniéndose constante el número de revoluciones  $n$ , o el número específico de revoluciones,  $n_s$ , se varía el caudal  $Q$  y se obtienen experimentalmente las curvas características:  $H$  vs.  $Q$ ,  $P_a$  vs.  $Q$  y  $\eta_{total}$  vs.  $Q$ .

En las instalaciones más corrientes, la bomba acoplada a un motor eléctrico de inducción, está destinada a girar a velocidad constante. Sin embargo, es frecuente que, aunque la bomba gire a  $n$  constante, el usuario necesite más o menos caudal, lo que sólo puede conseguirse abriendo o cerrando la válvula de impulsión.

El procedimiento típico de ensayo de bombas hidráulicas será el siguiente (Ver Figura 6.1):

1. Con ayuda del freno Prony, se mide el Torque (Par o Momento),  $M$ , generado por el eje del motor, cuando éste se frena. Luego, con el Tacómetro se mide el número de revoluciones por minuto (rpm) con el cual gira libremente el eje del motor, cuando se libera del freno.

$n$  (rpm), se convierte a,  $\omega$  (rad/s)

$$P_a = M \cdot \omega$$

Potencia al freno

Potencia absorbida en el eje

Potencia de accionamiento

Potencia en el eje

2. Con ayuda del vertedero, midiendo la carga de éste,  $h_v$ , se determina el caudal impulsado por la bomba,  $Q_B$ , con ayuda de la siguiente ecuación de calibración:

$$Q_B = c \cdot h_v^m$$

3. Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre (e) y (s), luego de establecer un flujo, a partir de una apertura de la válvula de regulación (válvula de compueta), resulta,

$$H_B = (z_s - z_e) + \left( \frac{p_s - p_e}{\gamma} \right) + \left( \frac{\alpha v_s^2}{2g} - \frac{\alpha v_e^2}{2g} \right)$$

4. Se calcula la potencia útil  $P_u$ , de la bomba, para un determinado caudal,  $Q_B$ .

$$P_u = \gamma \cdot Q_B \cdot H_u, \quad \text{siendo} \quad H_u = H_B$$

5. Se determina la eficiencia de la bomba,  $\eta_B$ .

$$\eta_B = \frac{P_u}{P_a} \times 100$$

6. Se obtiene el número específico de revoluciones de la bomba (velocidad específica),  $n_s$ .

$$n_s = 3.65 n \frac{Q_B^{1/2}}{H_B^{3/4}}$$

7. Se calcula el coeficiente de cavitación,  $\sigma$ , coeficiente de Thoma, en función del  $n_s$ , así:

$$\sigma = 0.000214 n_s^{4/3}$$

8. A partir de la ecuación del coeficiente de Thoma, para bombas semejante,

$$\sigma = \frac{\Delta h_{\text{int Bomba}}}{H_u} = \frac{NPSH_{\text{req}}}{H_B}$$

Se calcula el  $NPSH_{\text{req}}$ , así:

$$NPSH_{\text{req}} = \sigma \cdot H_B$$

9. Se prepara una tabla de valores de las características de la bomba ensayada.

BOMBA No. 1. ( $D_{rodete} = 300 \text{ mm}$ );  $T_{\text{agua}} =$  ;  $p_v =$  ;  $n =$  rpm;  $M =$  ;  $\omega =$  rad/s.

Ensayo No.	1	2	3	...
M (kgf.m)				
n (rpm)				
$\omega$ (rad/s)				
$P_a$ (kgf.m/s)				
$h_v$ (mm)				
$Q_B$ (l/s)				
$v_s$ (m/s)				
$v_e$ (m/s)				
$p_s$ (kgf/m <sup>2</sup> )				
$p_e$ (kgf/m <sup>2</sup> )				
$H_B$ (m)				
$P_u$ (kW)				
$\eta_B$ (%)				
$n_s$				
$\sigma$ (adimensional)				
$NPSH_{req}$ (m)				

Figura No. 6.2 Tabla de valores de las características de la bomba ensayada

Para el diligenciamiento de la tabla anterior se emplearan las siguientes ecuaciones:

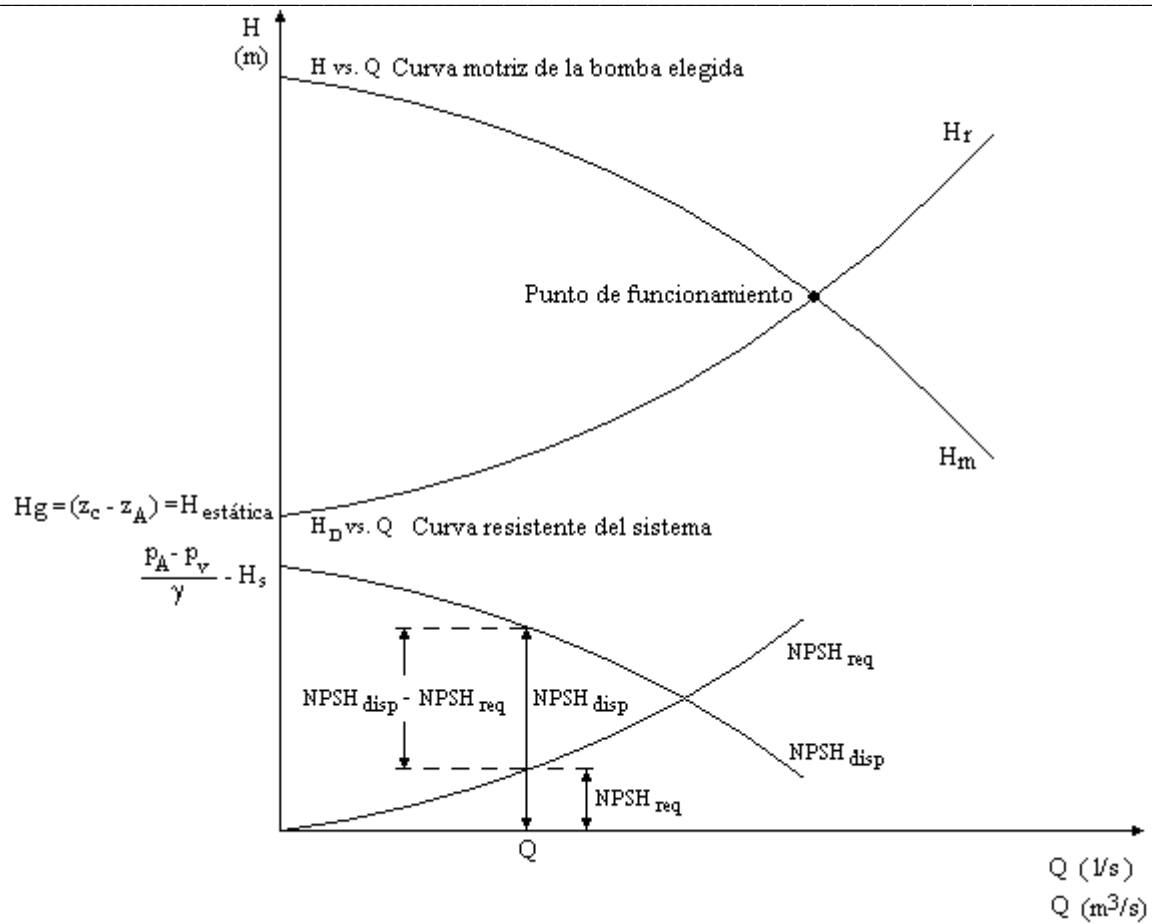
$P_a = P_{eje}$	$v_s = \frac{4 Q_B}{\pi D_s^2}$
$v_e = \frac{4 Q_B}{\pi D_i^2}$	$P_u = \gamma \cdot Q_B \cdot H_u$
$\eta_B = \frac{P_u}{P_a} \times 100$	$n_s = 3.65 n \frac{Q_B^{1/2}}{H_B^{3/4}}$
$\sigma = 0.000214 n_s^{4/3}$	$NPSH_{req} = \sigma \cdot H_B$
$H_B = (z_s - z_e) + \left( \frac{P_s - P_e}{\gamma} \right) + \frac{\alpha}{2g} (v_s^2 - v_e^2)$	

Como  $P_a = M \cdot \omega$ , y además M y n ( $\omega$ ) no son constante, sino que varían con  $Q_B$ , se deduce que  $P_a = f(Q_B)$ , también varía con  $Q_B$ .

Todo ello, porque al variar el punto de funcionamiento de la bomba, es decir, modificando el caudal  $Q_B$ , se modifican ligeramente el par M, y la velocidad de giro, n o  $\omega$ .

Al graficar las curvas de variación H vs.  $Q_B$ , h vs.  $Q_B$  y  $NPSH_{req}$  vs.  $Q_B$ , se obtiene un conjunto de curvas como el que se muestra en la Figura 6.5.

10. Se construyen las Curvas Características de la bomba ensayada:



$$H_r = H_{est} + r \cdot Q^2$$

$$NPSH_{disp} = \frac{P_A - P_V}{\gamma} - H_s - r_{succión} \cdot Q^2$$

Figura No. 6.3 Curva motriz de la bomba elegida

Si la bomba está bien escogida, funcionará normalmente en las condiciones llamadas nominales, a saber:  $Q_N$ ,  $H_N$ ,  $P_{aN}$ ,  $n_N$  (este último será el número de rpm del motor eléctrico), es decir, la bomba marchará en el Punto de Funcionamiento o Punto de Mejor Operación o Punto de Mejor Rendimiento, para el cual el rendimiento total,  $\eta_{total}$ , es máximo.

Así, para obtener las curvas características de una bomba, se hacen varios ensayos (10, 15 ó 20) a diferentes aperturas de válvulas de impulsión, desde la apertura completa hasta el

cierre completo, manteniendo constante el número de revoluciones,  $n$ . En cada ensayo o punto se miden  $Q$ ,  $H$ ,  $P_a$  y  $\eta_{total}$ . Cada uno de estos puntos se representa en un plano cartesiano, tomando  $Q$  como abscisa, y como ordenadas a  $H$  (primera curva) o  $P$  (segunda curva) o  $\eta_{total}$  (tercera curva), resultando, en consecuencia, cualquier conjunto de curvas de los mostrados en la Figura 6.4.

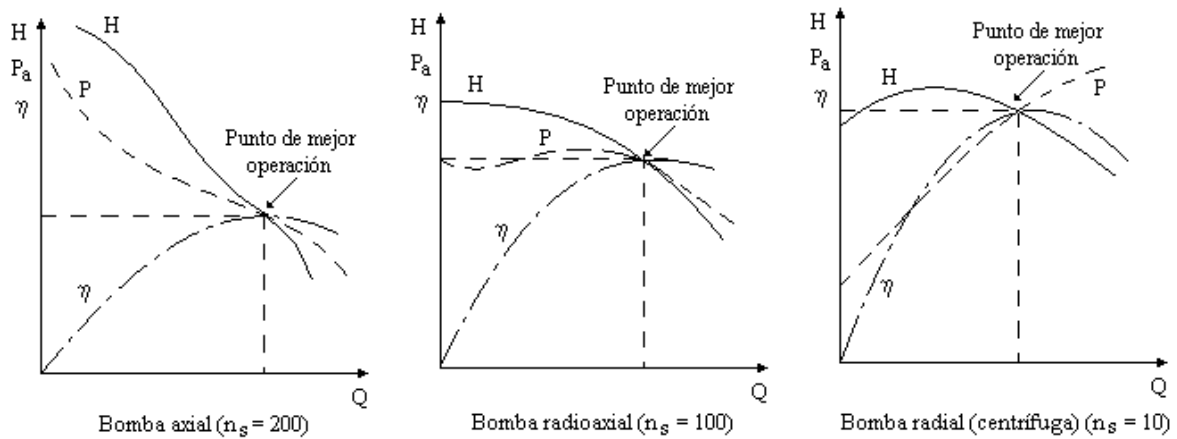


Figura No. 6.4 Curvas características de distintos tipos de bombas

Después de analizar y comparar las curvas características de los distintos tipos de bombas mostrados en la Figura 2.24, se concluye lo siguiente:

- La altura  $H$  aumenta al incrementarse el valor de la velocidad específica,  $n_s$ , aumenta. Además, la curva  $H$  vs.  $Q$  se hace más pendiente con el aumento de la velocidad específica.
- La altura  $H$  que suministra la bomba, en general, disminuye con el aumento de la descarga,  $Q$ .
- La potencia  $P_a$  es mayor para valores altos de la velocidad específica; para valores más bajos de  $n_s$ , la potencia absorbida aumenta con la descarga  $Q$ .
- La eficiencia de la bomba aumenta progresivamente con el caudal hasta cierto valor de éste, a partir del cual disminuye aquella.



- La curva de potencia absorbida es decreciente con el aumento del caudal impulsado, en el caso de alta velocidad específica; y en el caso de velocidad específica baja, es una curva ascendente. Esta es una curva sobrecargante, pues, después de alcanzar el punto de mejor operación de la bomba, la curva sigue subiendo.
- En bombas centrifugas de baja velocidad específica es frecuente encontrar inestabilidad en el punto de operación, pues, a un valor de  $H$  corresponden dos valores de  $Q$ . Se puede aumentar la estabilidad de la curva  $H$  vs.  $Q$ , reduciendo el número de álabes en el rotor, o empleando ángulos de salida del álabe, pequeños.
- De las curvas de potencia absorbida, para las diferentes velocidades específica, se puede concluir que una bomba de alta velocidad específica debe arrancarse con la válvula de control totalmente abierta, a efectos de prevenir presiones excesivas. Lo contrario ocurre en las bombas de baja velocidad específica, las cuales deben arrancar con una válvula de control cerrada.

#### 6.4. ENSAYO COMPLETO DE UNA BOMBA ROTODINÁMICA

Es un conjunto de ensayos elementales caracterizados por un número distinto de revoluciones. Consta de varias curvas  $H$  vs.  $Q$ , de varias curvas  $\eta_{\text{total}}$  vs.  $Q$  y de varias curvas  $NPSH_{\text{req}}$  vs.  $Q$ . Al conjunto de todas ellas se les llama curvas en concha o colinas de rendimiento. Véanse las Figuras 6.5 y 6.6.

Las bombas pueden accionarse no sólo por motores de inducción de velocidad constante, sino también por aquellos de velocidad regulable, a través de cambios mecánicos de velocidad, es decir, una bomba puede operar a números de revoluciones distintos.

Un ensayo completo se puede desarrollar de la siguiente manera:

- Se hace un cierto número de ensayos elementales (cinco a ocho), haciendo girar sucesivamente la bomba a número de revoluciones distinto, cada vez, (por ejemplo, 1450, 1750, 2000, 3500 rpm, etc.).

- Se llevan las curvas H vs. Q de estos ensayos a un mismo gráfico.
- Para cada ensayo elemental se escogen los mismos valores redondos de eficiencia (por ejemplo, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 %), sobre la curva  $\eta$  vs. Q correspondiente.
- Los valores de eficiencia escogidas en el paso anterior se proyectan hacia arriba en la curva H vs. Q correspondiente.
- Finalmente, se unen los puntos de igual rendimiento, del conjunto de curvas H vs. Q, obteniéndose así las curvas de  $\eta_{\text{total}} = 40\%$ ,  $45\%$ ,  $50\%$ ,  $55\%$ ,  $60\%$ ,  $65\%$ ,  $70\%$  y  $75\%$ , por ejemplo.

Diversas curvas en concha o colinas de isoeficiencias se pueden apreciar en las Figuras 6.5 y 6.6.

Las curvas de igual rendimiento son como las curvas de nivel en un plano topográfico. En efecto, el plano H - Q es como el terreno en planta; el tercer eje, en un sistema cartesiano tridimensional, es el eje de las eficiencias totales,  $\eta_{\text{total}}$ ; y las curvas de isoeficiencias son proyecciones en el plano H - Q de las intersecciones de la superficie  $\eta_{\text{total}} = f(Q, H)$  con planos horizontales trazados a alturas diferentes como, por ejemplo: 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75.

Estas curvas se hacen cada vez más interiores a medida que la eficiencia aumenta.

El ensayo completo de una bomba revela todas las posibilidades, funcionando de todas las maneras posibles dentro de su campo característico. Obsérvese la disminución de la cabeza, H, cuando el diámetro del rotor se hace menor. (Ver las Figuras 6.5 y 6.6).

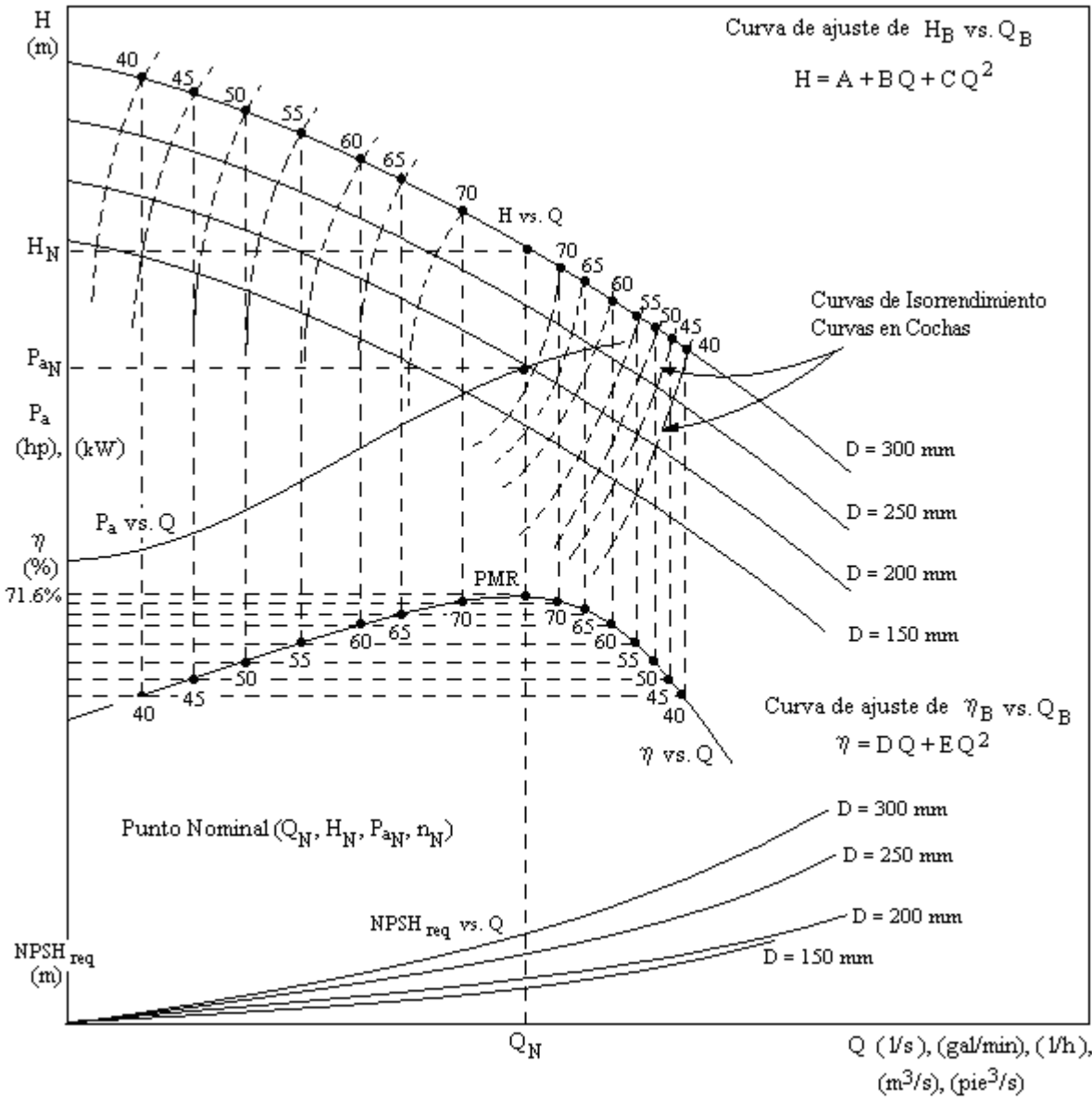


Figura No. 6.5 Curvas características de bombas de diferentes tamaños

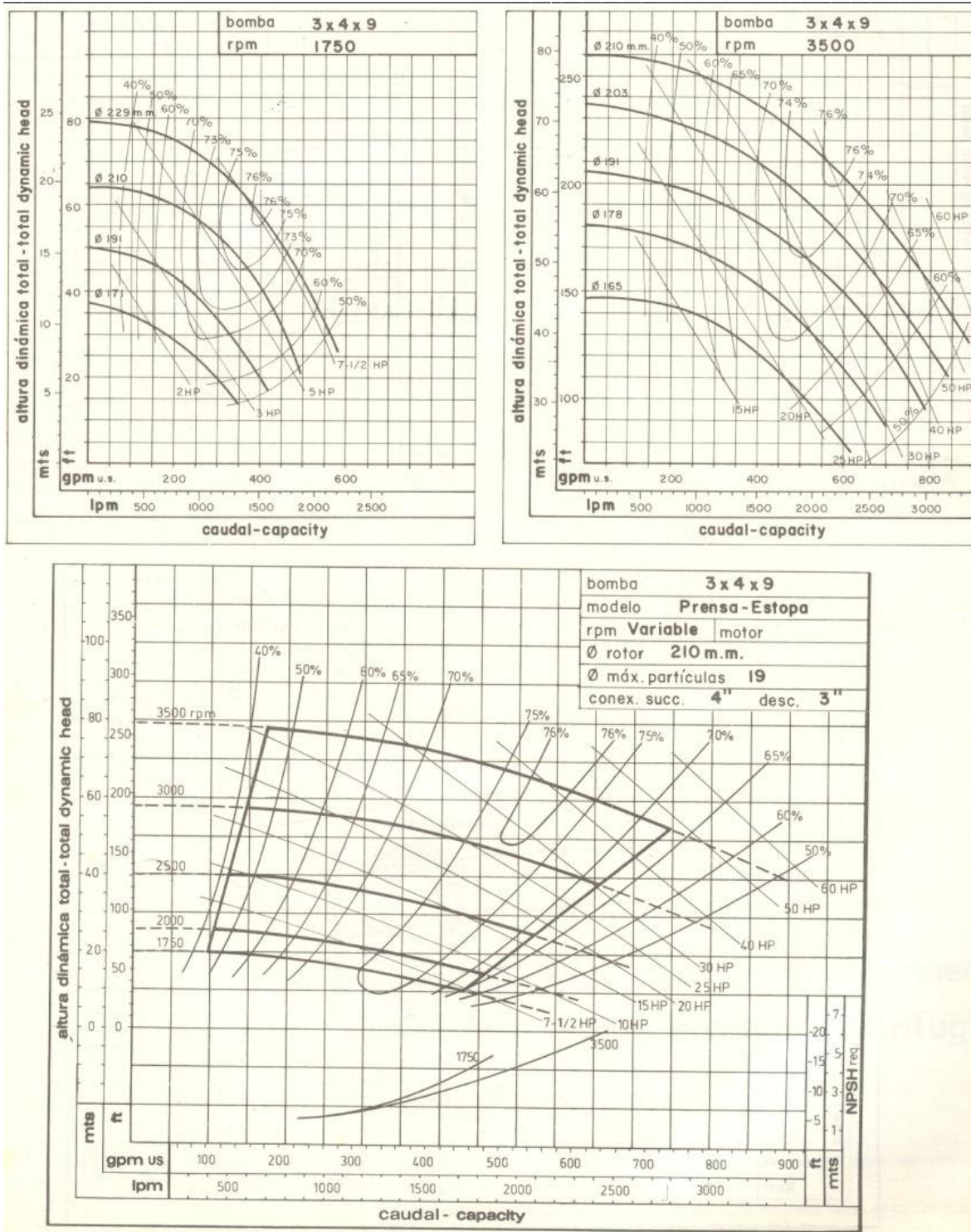


Figura No. 6.6 Curvas características y colinas de isoeficiencia de bombas rotodinámicas.

Adaptadas del catálogo comercial de la Firma IHM