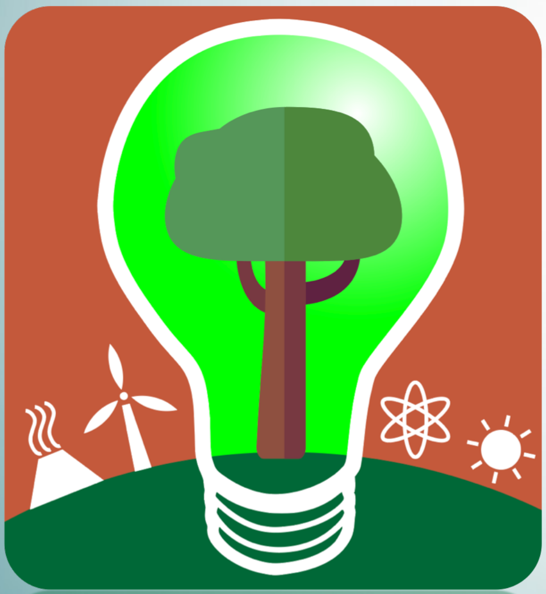
Transformación y Uso Eficiente de la Energía

Bloque II. Electricidad

1. Mejora de la eficiencia en sistemas de transporte de fluidos



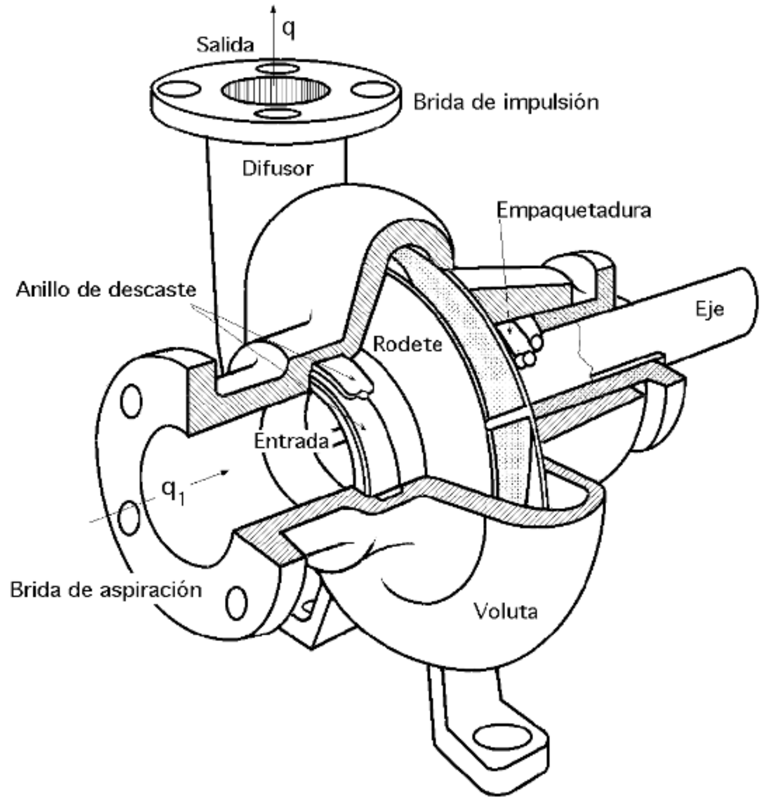
Juan Carcedo Haya

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

BOMBAS HIDRÁULICAS

Una bomba es una máquina hidráulica de tipo generador, que absorbe energía mecánica y restituye al líquido energía hidráulica. Se clasifican en dos grandes grupos: Rotodinámicas y volumétricas.

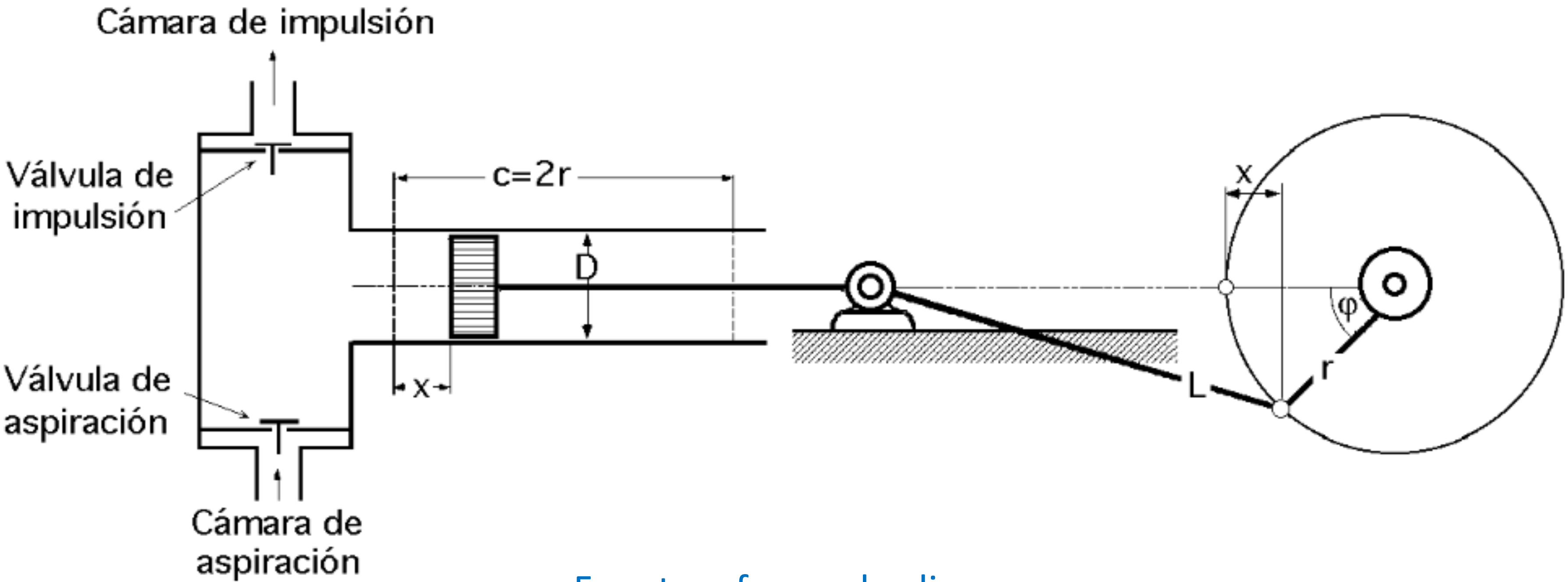
- Rotodinámicas: Se basan en el intercambio de cantidad de movimiento a través de un elemento rotativo (rodete)



BOMBAS HIDRÁULICAS

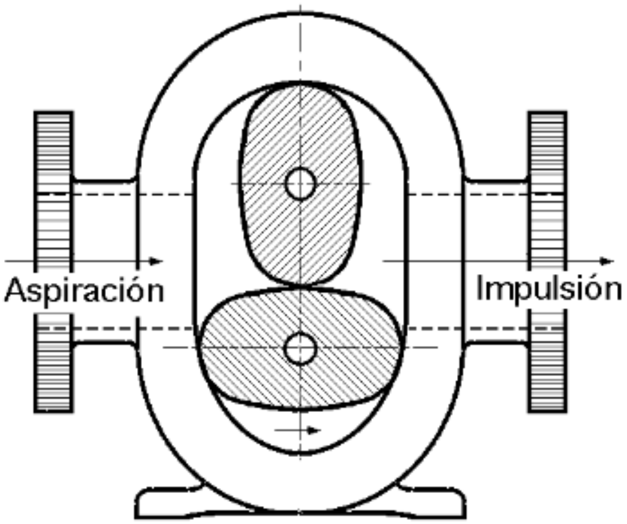
Una bomba es una máquina hidráulica de tipo generador, que absorbe energía mecánica y restituye al líquido energía hidráulica. Se clasifican en dos grandes grupos: Rotodinámicas y volumétricas.

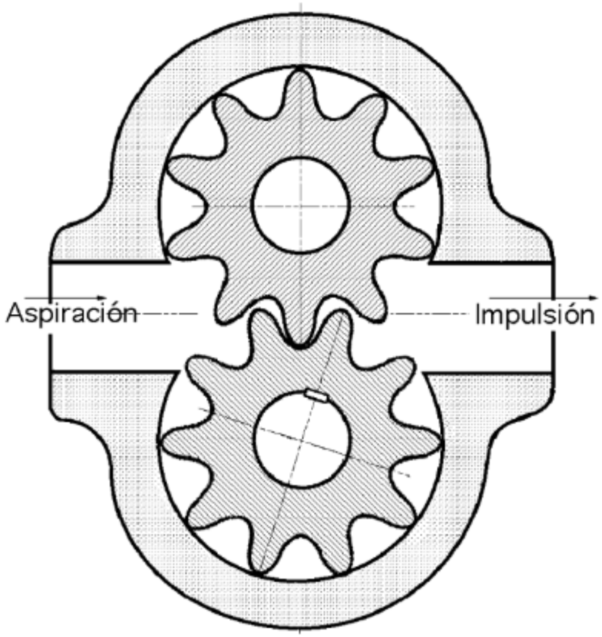
- Volumétricas: Se basan en el desplazamiento periódico de una porción de fluido.



Fuente: pfernandezdiez.es

Otras bombas volumétricas:



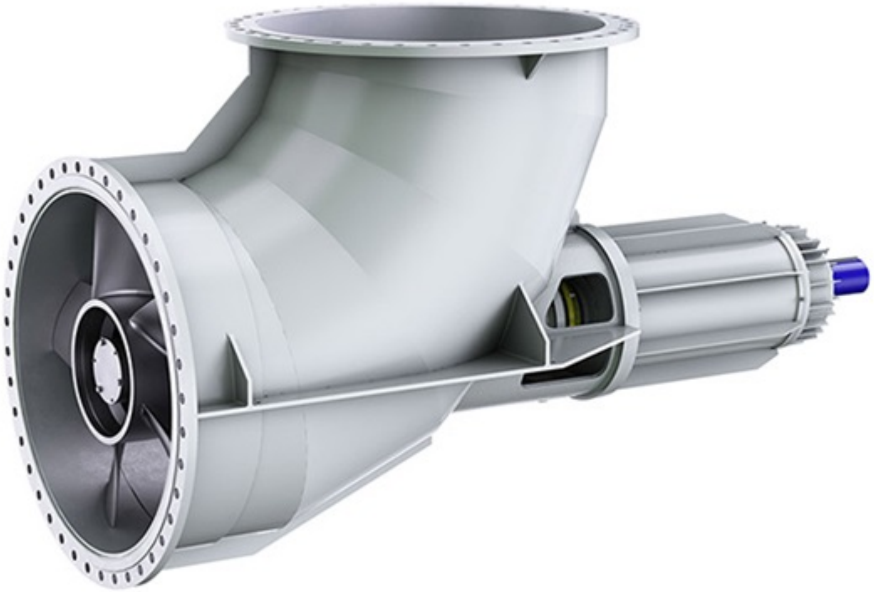


Fuente: pfernandezdiez.es

BOMBAS HIDRÁULICAS

En adelante nos centraremos en las bombas rotodinámicas.

Según la forma del rodete, pueden ser axiales o radiales. Las más habituales son las radiales o centrífugas.



Fuente: www.sulzer.com

Fuente: www.seguas.com

BOMBAS HIDRÁULICAS

Algunas bombas centrífugas:

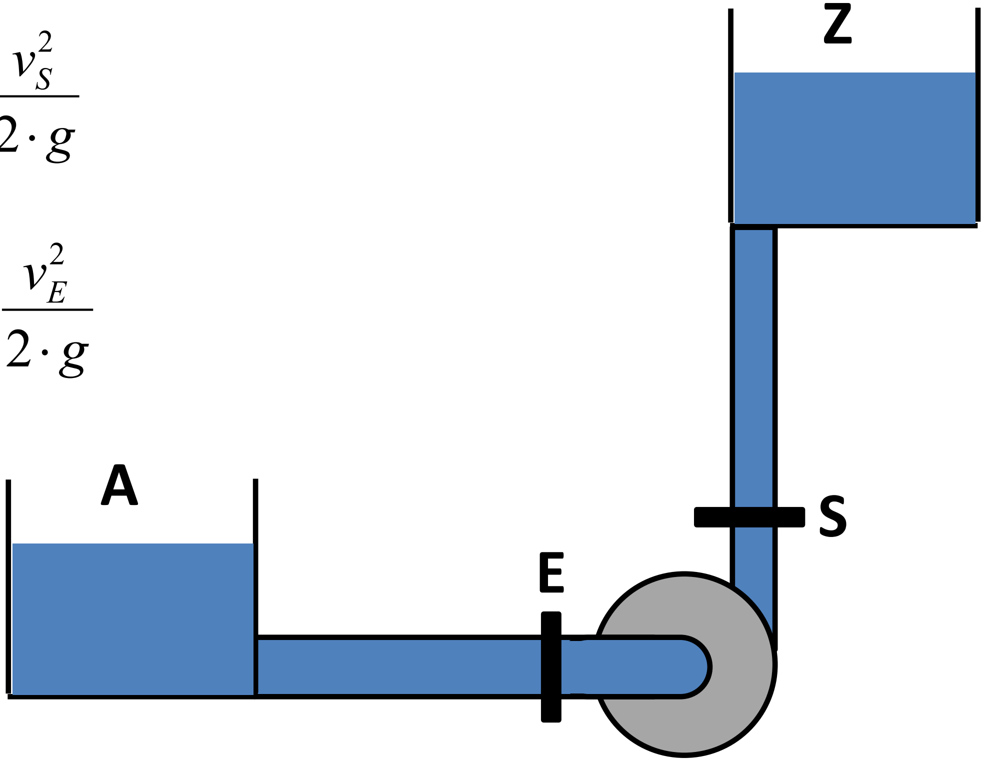
Fuente: wilo.com

La figura muestra un posible montaje de una bomba rotodinámica. Si se escribe la ecuación de Bernoulli entre la brida de entrada y la de salida, se obtiene la expresión de la altura útil que da la bomba:

$$\frac{p_E}{\rho \cdot g} + z_E + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} + H = \frac{p_S}{\rho \cdot g} + z_S + \frac{v_S^2}{2 \cdot g}$$

$$H = \frac{p_S}{\rho \cdot g} + z_S + \frac{v_S^2}{2 \cdot g} - \frac{p_E}{\rho \cdot g} - z_E - \frac{v_E^2}{2 \cdot g}$$

$$\boxed{H = \frac{p_S - p_E}{\rho \cdot g} + z_S - z_E + \frac{v_S^2 - v_E^2}{2 \cdot g}}$$

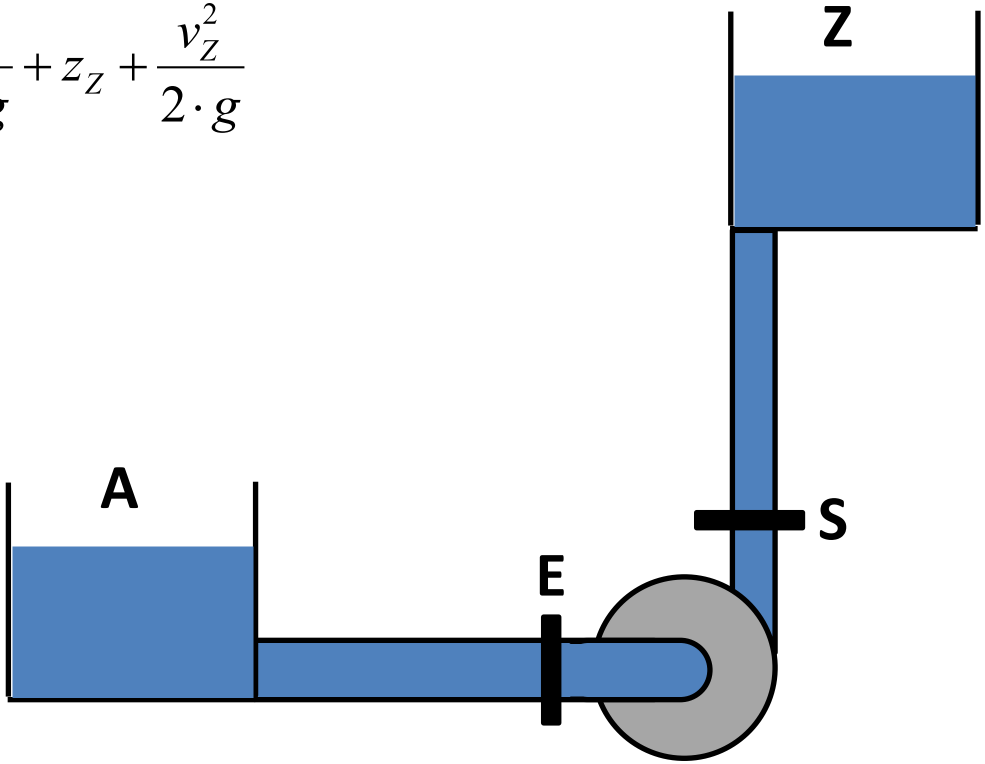


Bomba en funcionamiento

Por otra parte, si se escribe la ecuación de Bernoulli entre el inicio y el final de la instalación, se obtiene la *curva resistente del circuito*:

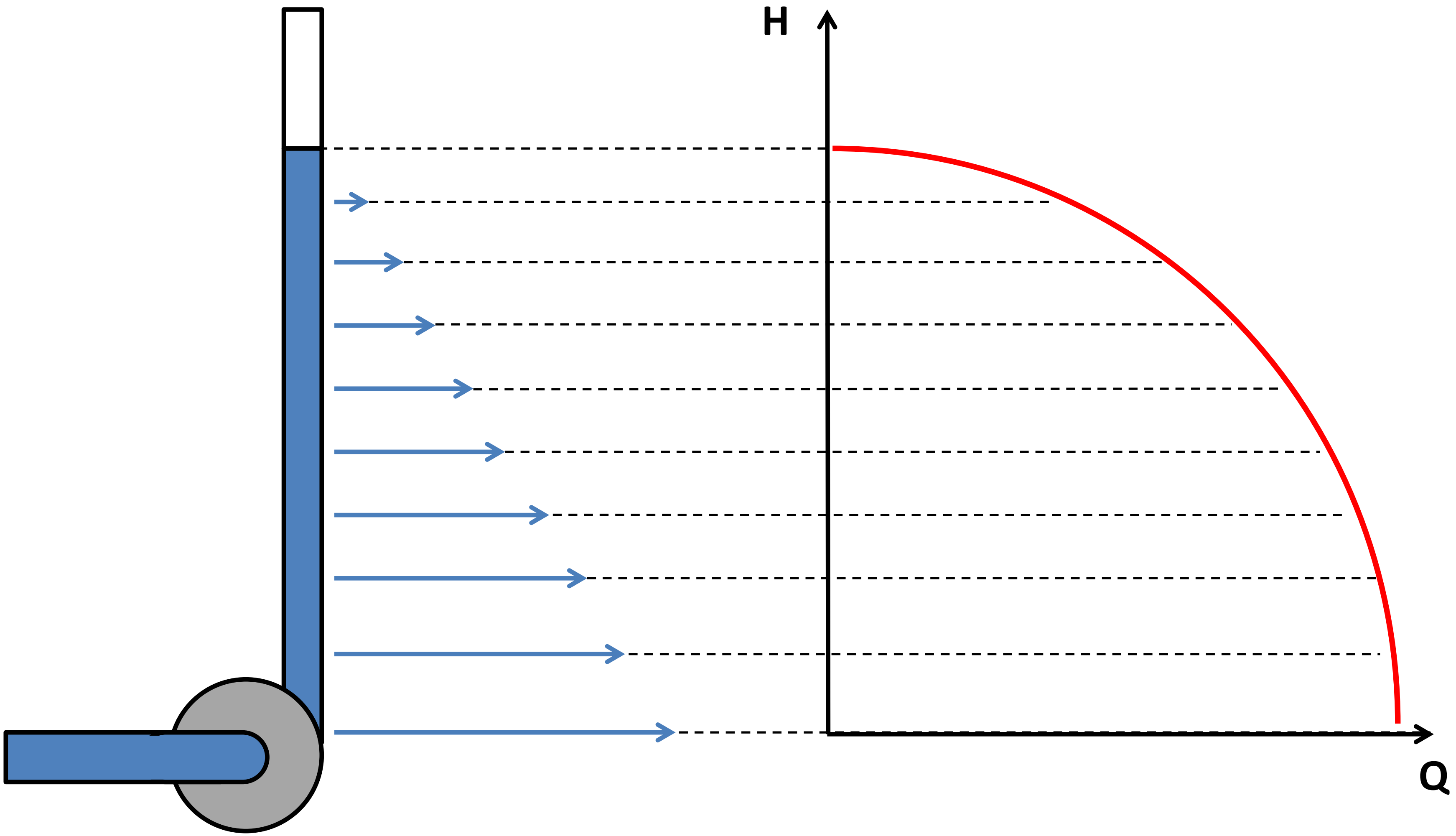
$$\frac{p_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} - h_{r-ext} + H = \frac{p_Z}{\rho \cdot g} + z_Z + \frac{v_Z^2}{2 \cdot g}$$

$$\boxed{H = \frac{p_Z - p_A}{\rho \cdot g} + z_Z - z_A + h_{r-ext}}$$



Bomba en proyecto

BOMBAS HIDRÁULICAS



A una determinada velocidad de giro, una bomba centrífuga tiene una curva característica como la siguiente:

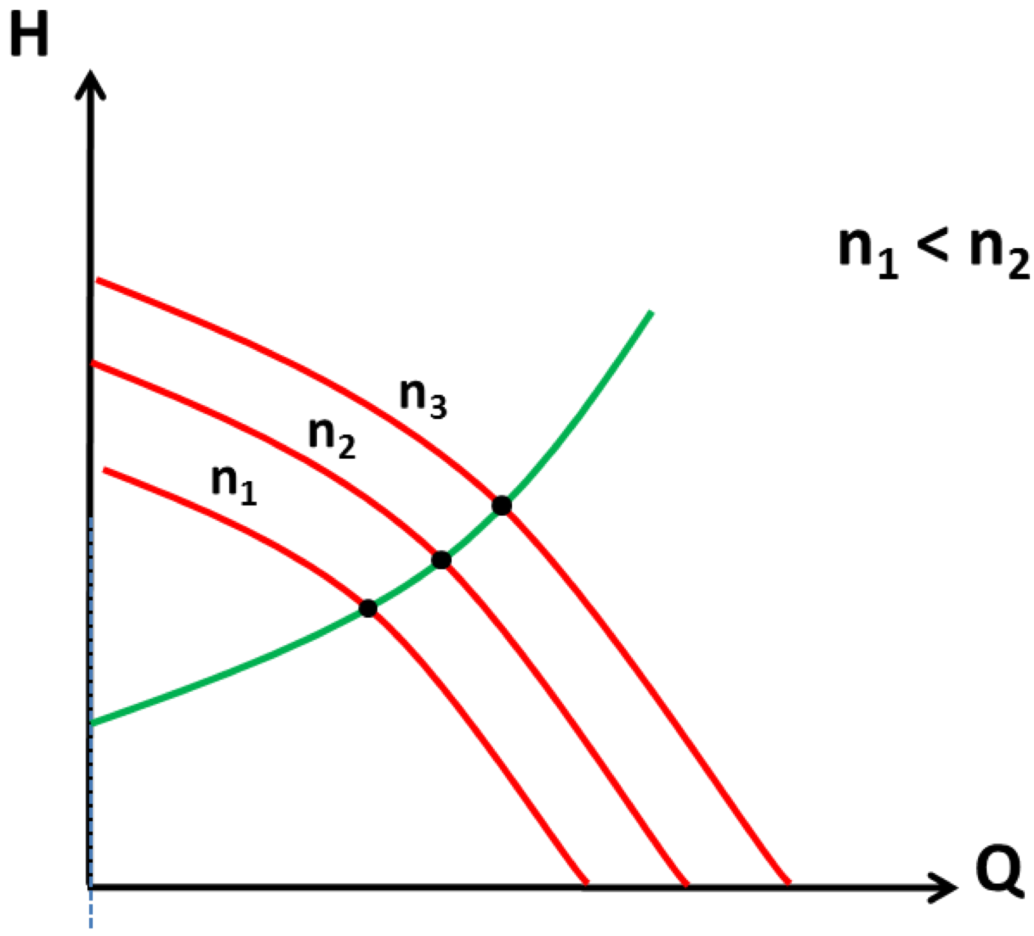
$$H = A - B \cdot Q - C \cdot Q^2$$

En general, será de tipo:

$$H = C_1 \cdot n^2 - C_2 \cdot n \cdot Q - C \cdot Q^2$$

n es la velocidad de giro.

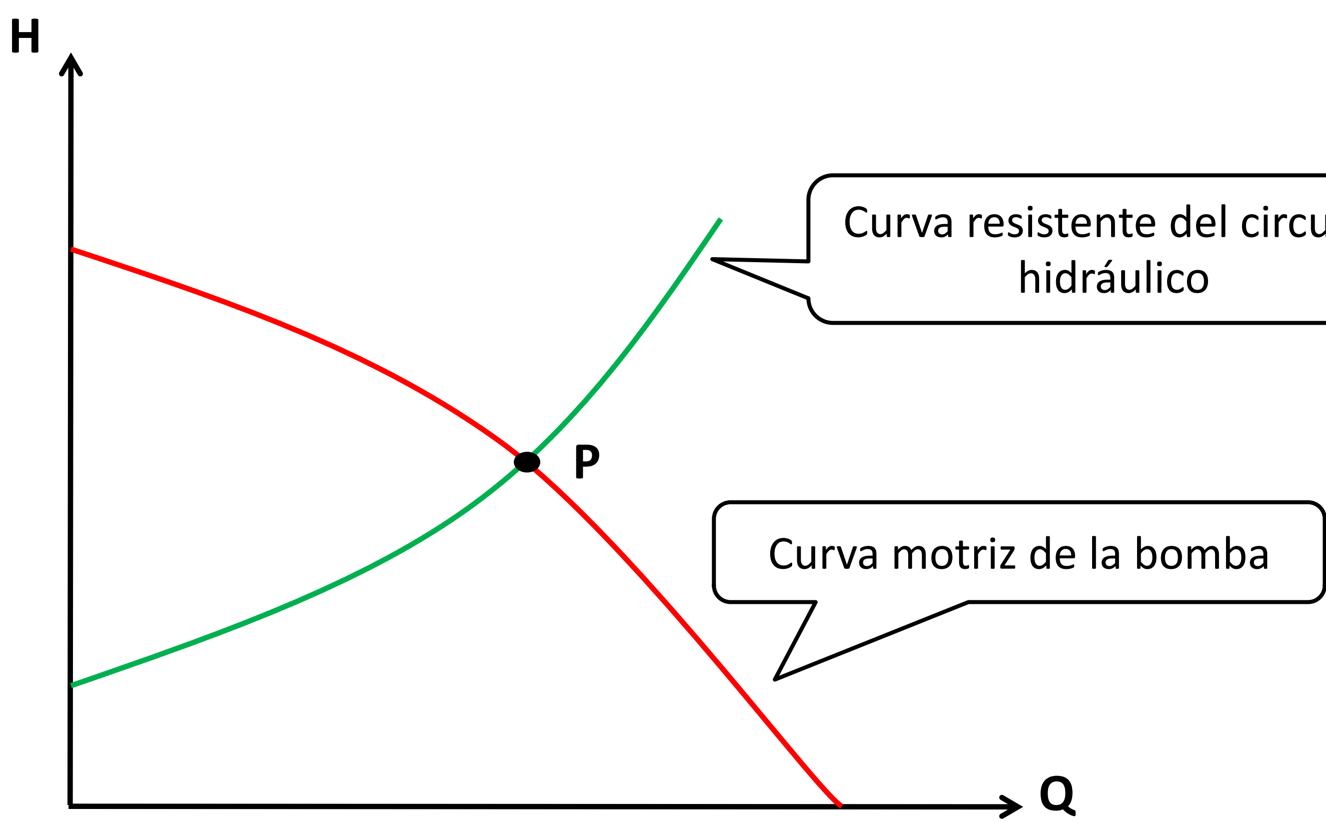
Representación gráfica de la curva característica de una bomba centrífuga



Por lo tanto, el punto de funcionamiento será aquél en el que coinciden la curva característica de la bomba y la curva resistente del circuito.

$$H = \frac{p_S - p_E}{\rho \cdot g} + z_S - z_E + \frac{v_S^2 - v_E^2}{2 \cdot g}$$

$$H = \frac{p_Z - p_A}{\rho \cdot g} + z_Z - z_A + h_{r-ext}$$



La altura útil que suministra una bomba NO depende del fluido bombeado.

Pongamos por caso una bomba que suministra una altura de 150 m. Al poner en marcha la bomba se crea una diferencia de presiones entre la brida de impulsión y la de aspiración.

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H$$

Si la bomba está descebada, es decir, llena de aire, dicha presión es:

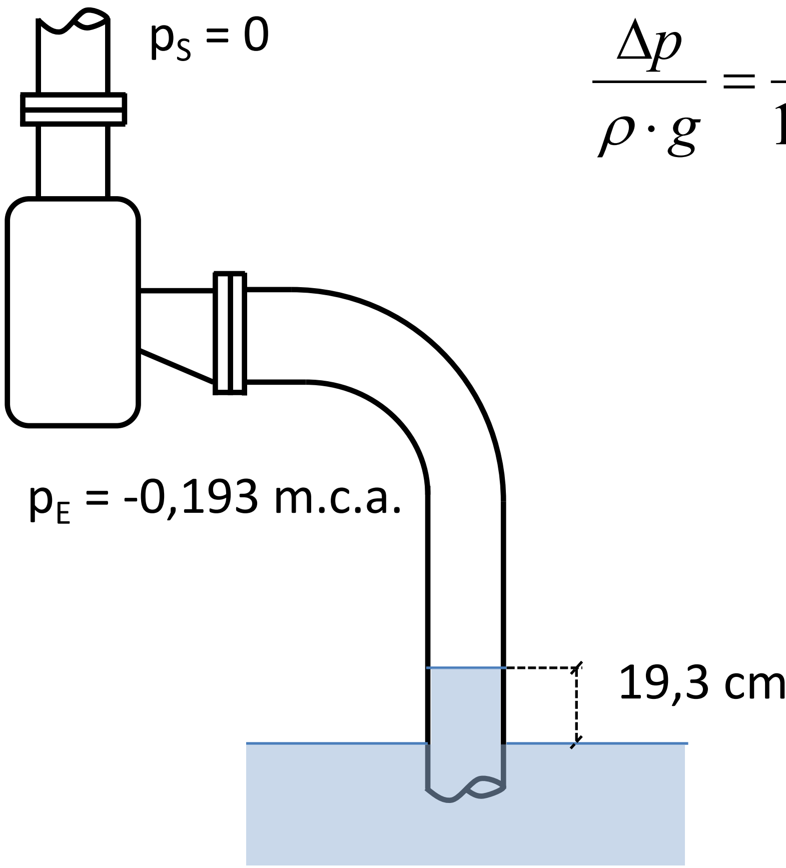
$$\Delta p_{aire} = \rho_{aire} \cdot g \cdot H = 1{,}29 \cdot 9{,}81 \cdot 150 = 1.898{,}2\,Pa$$

Si la bomba está cebada, es decir, llena de agua, dicha presión es:

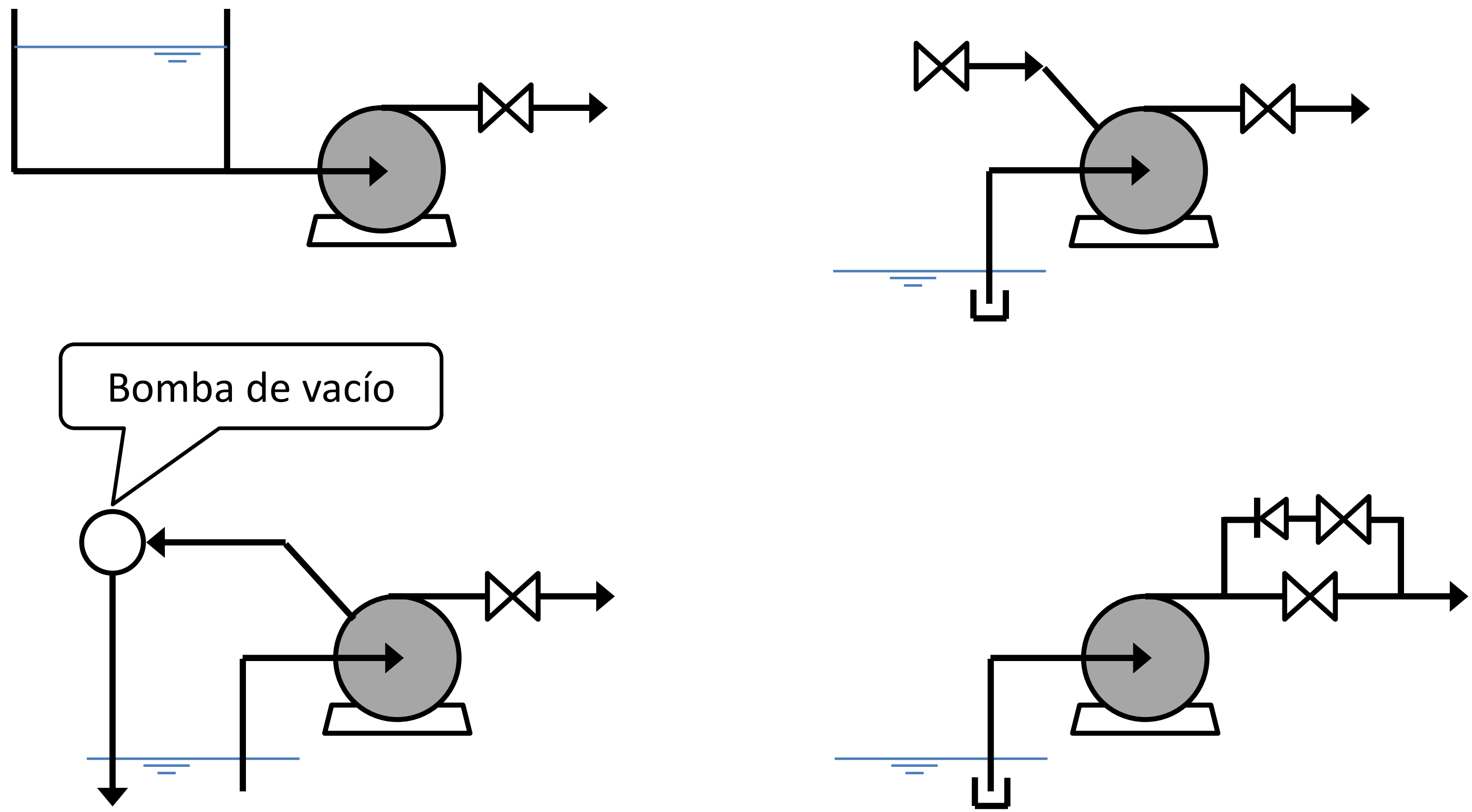
$$\Delta p_{agua} = \rho_{agua} \cdot g \cdot H = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 150 = 1.471.500\,Pa$$

Es decir, en el caso de que esté descebada, da lugar a una depresión en la aspiración equivalente a:

$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \frac{1.898,2}{1000 \cdot 9,81} = 0,193\ m.c.a.$$

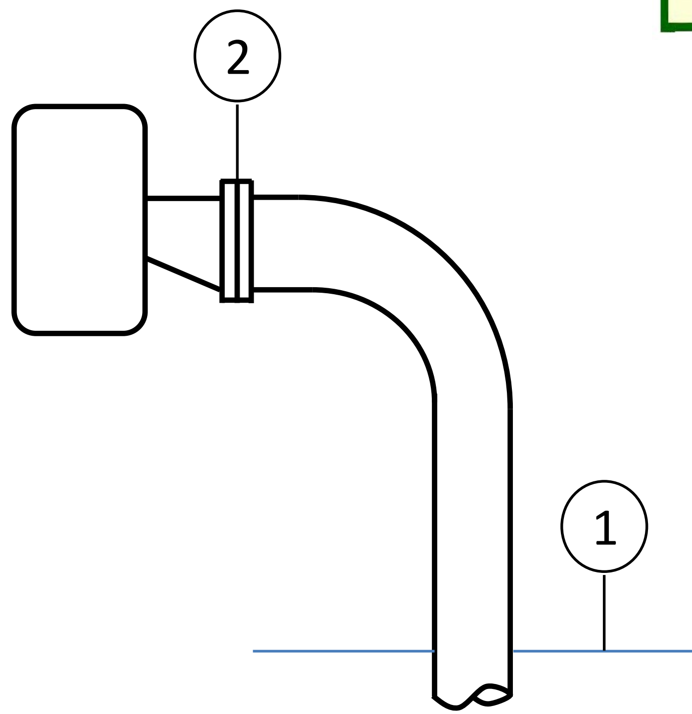


Algunos sistemas de cebado:



CAVITACIÓN

Ecuación de Bernoulli entre 1 y 2:



$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - h_{r\ asp} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

$$\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} - (z_2 - z_1) - h_{r\ asp}$$

El primer miembro de esta igualdad se denomina *altura bruta disponible a la entrada*.

Como el líquido bombeado tiene una cierta presión de saturación (o de vapor), la energía bruta anterior sólo es “utilizable” hasta dicha presión. Por debajo de ese valor comienza a producirse la cavitación.

$$\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{p_{sat}}{\rho \cdot g} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} - H_a - h_{r\,asp} - \frac{p_{sat}}{\rho \cdot g}$$

El primer miembro de esta igualdad se conoce como *altura neta disponible a la entrada* o $NPSH_d$.

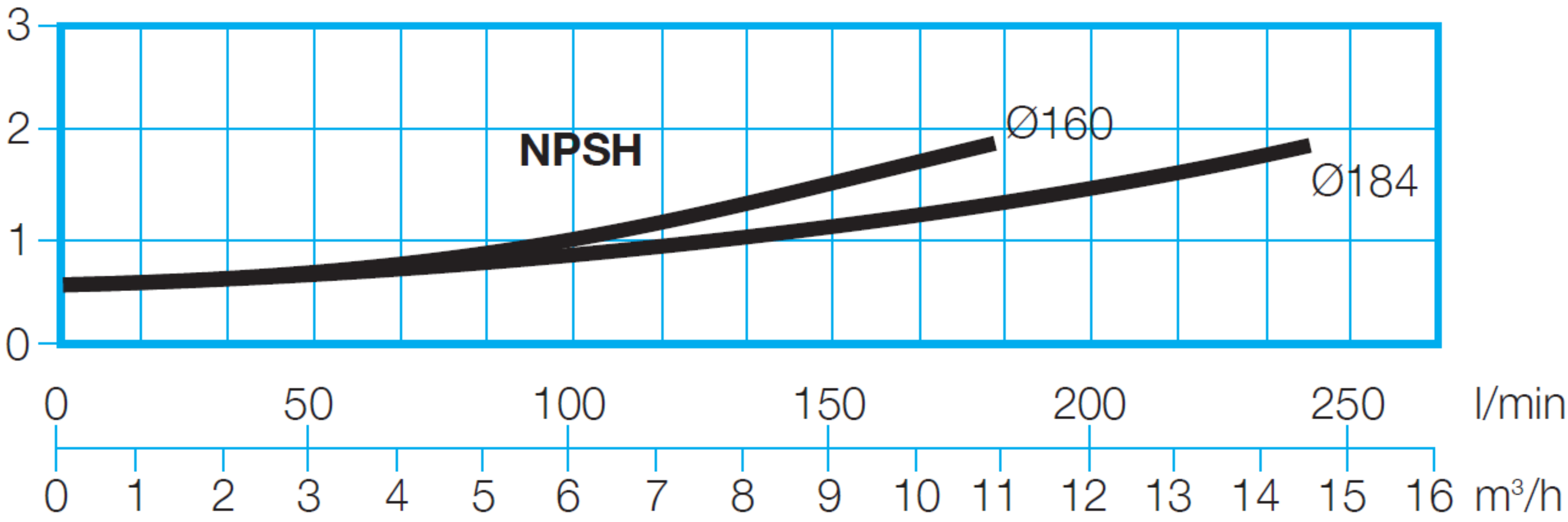
$$\boxed{NPSH_d = \frac{p_1 - p_{sat}}{\rho \cdot g} - H_a - h_{r\,asp}}$$

Si el depósito del que se aspira está abierto a la atmósfera, se tiene:

$$NPSH_d = \frac{p_{atm} - p_{sat}}{\rho \cdot g} - H_a - h_{r\,asp}$$

Cuidado con las presiones absolutas y las relativas.

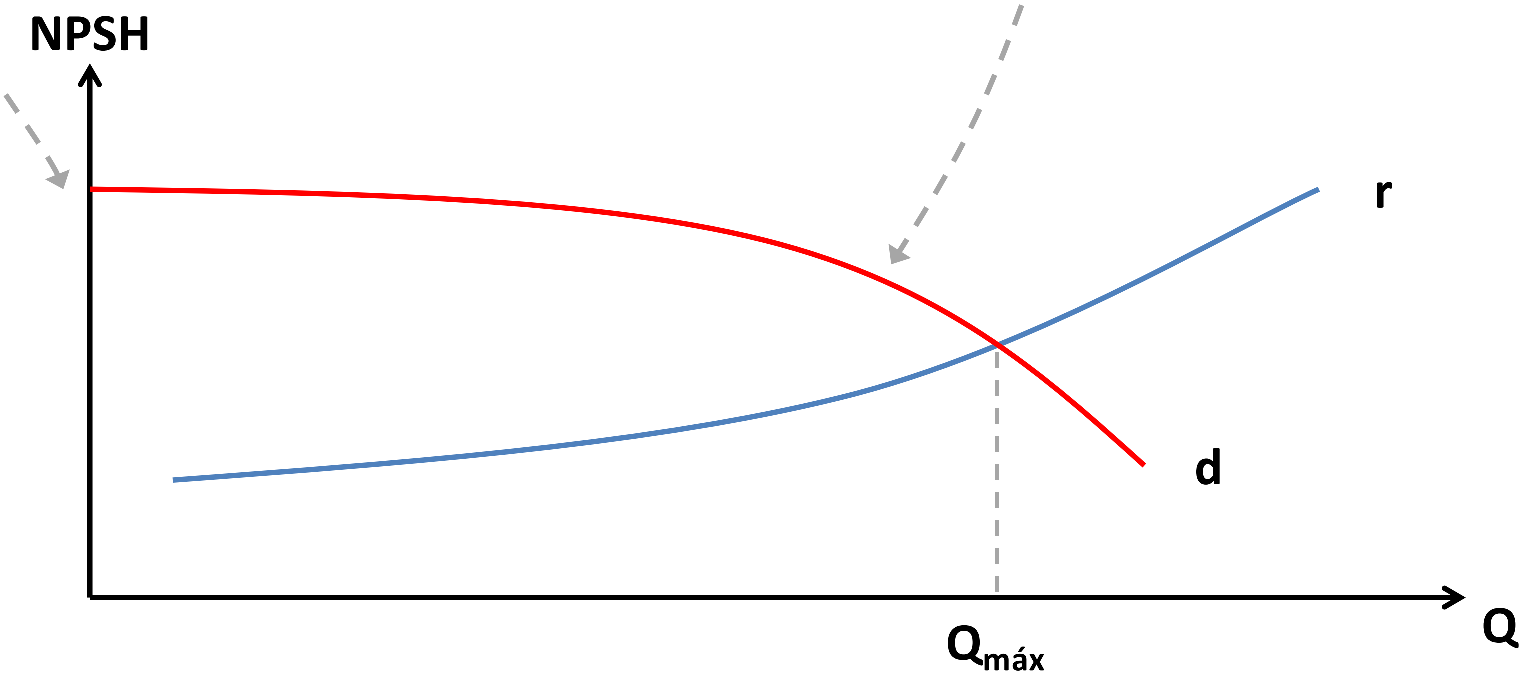
Para que no se produzca la cavitación es necesario que la altura neta de aspiración disponible sea superior un mínimo, denominado *altura neta de aspiración requerida*. Este valor depende del tipo de bomba, de su construcción y del punto de funcionamiento, por lo que debe ser un dato suministrado por el fabricante. La manera de determinarlo es mediante ensayo. Además, forma parte de la información suministrada en los catálogos de los fabricantes.



Fuente: www.bombasideal.com

BOMBAS HIDRÁULICAS

$$NPSH_d = \frac{p_1 - p_{sat}}{\rho \cdot g} - H_a - k \cdot Q^2$$



CAVITACIÓN

Fuente: www.jadominguez.com

BOMBAS HIDRÁULICAS

Cuando una bomba suministra un caudal Q a una altura H (es decir, a una presión p) está entregando al líquido una potencia hidráulica P.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Por otro lado, la bomba absorberá una potencia P_{abs} en el eje. Puesto que se trata de una máquina de tipo generador, se cumple que $P_{abs} > P$.

Se define entonces el rendimiento de la bomba como:

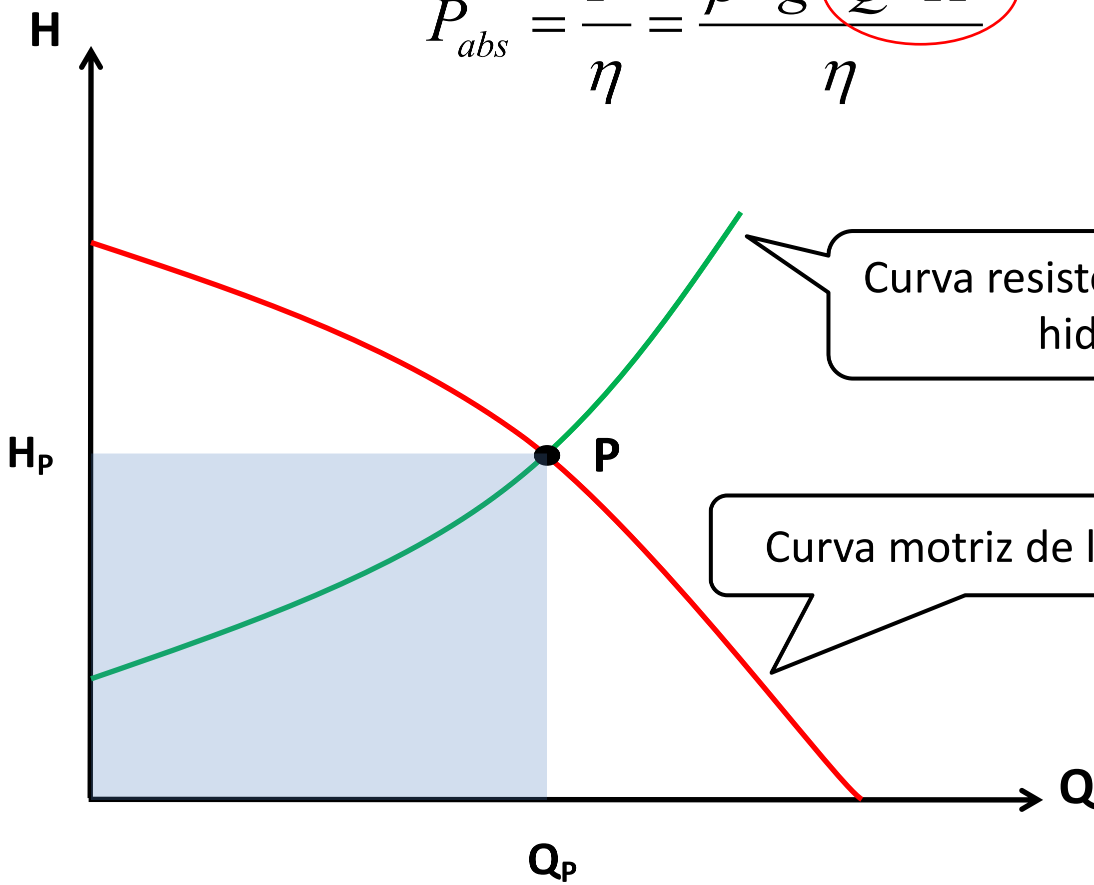
$$\eta = \frac{P}{P_{abs}}$$

BOMBAS HIDRÁULICAS

La potencia absorbida es proporcional al área sombreada en la figura:

$$P_{abs} = \frac{P}{\eta} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

Rectángulo sombreado



Ejemplo 1: A partir de los datos obtenidos en el ensayo con agua de una bomba centrífuga a 1450 rpm, obtener sus curvas $H = f(Q)$ y $\eta = f(Q)$

Determinar las condiciones del punto de trabajo nominal.

Q (l/s)	H (m)	Peje (kW)
40	32	34,2
80	30,5	39,2
120	28	45
160	24,5	52,5
200	20	64,5

Con frecuencia se requiere regular el punto de trabajo (demanda variable), para lo cual se debe:

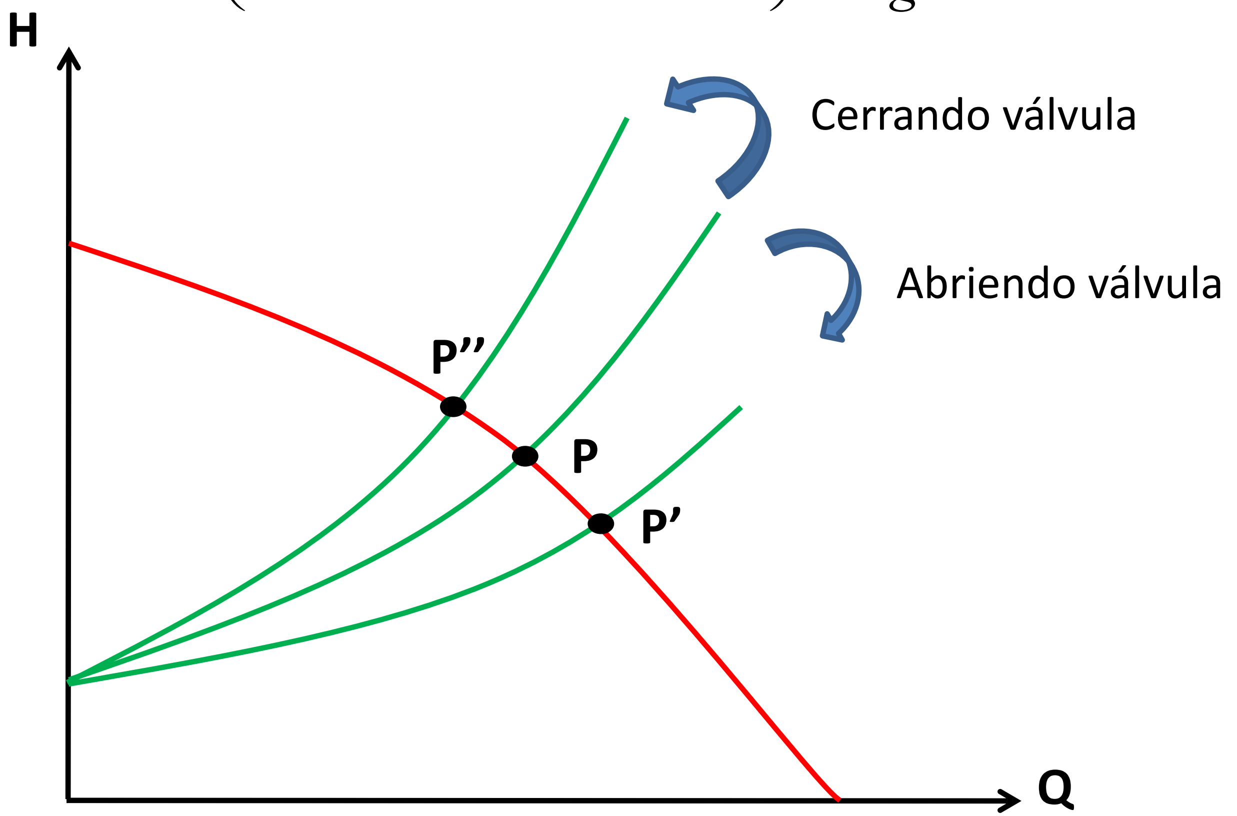
- Variar la curva característica del circuito hidráulico
- Variar la curva característica de la bomba
- Variar ambas curvas simultáneamente

Variar la curva característica del circuito hidráulico

Cómo se hace:

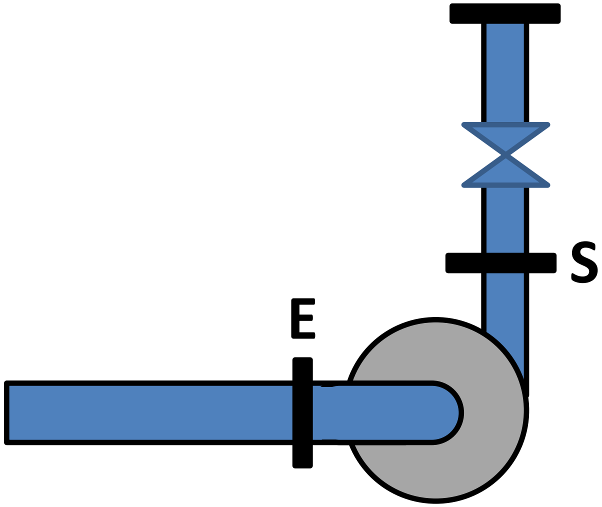
$$h_r = \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \zeta_1 + \zeta_2 + \ldots + \zeta_n \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Consecuencias:



Variar la curva característica del circuito hidráulico

Se actúa sobre la válvula **de impulsión**. Sobre la de aspiración no porque podría provocarse cavitación.



Variar la curva característica de la bomba

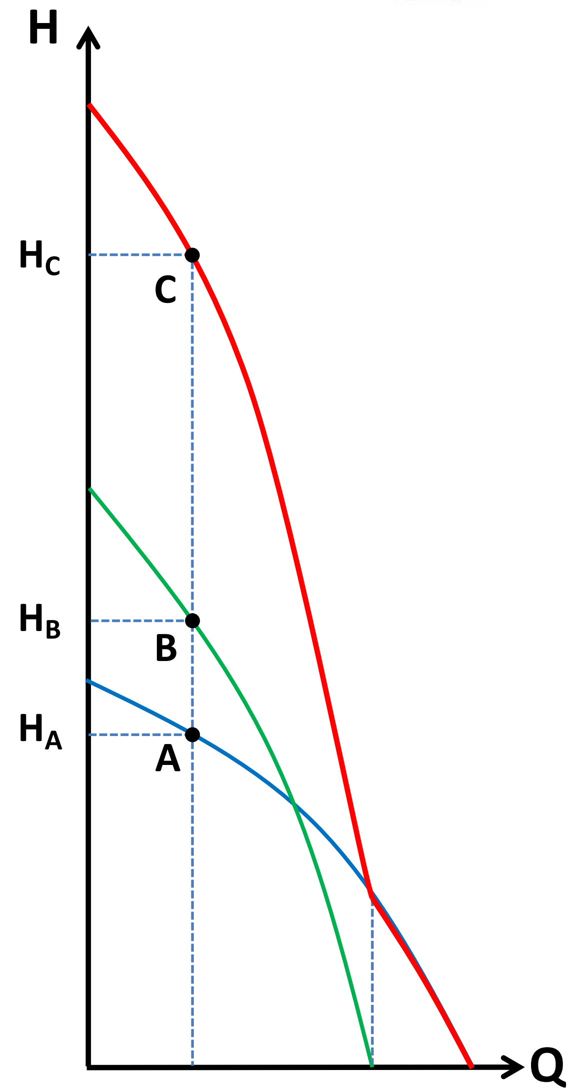
Cómo se hace: Acoplamiento de **bombas en serie**

Si la **altura** que hay que suministrar al fluido no es alcanzable con una bomba, se pueden instalar dos (o más) en serie, de modo que al pasar el flujo por cada bomba, la energía suministrada se va sumando.

En este caso, la curva característica resultante del acoplamiento se obtiene mediante la suma de la altura de elevación de cada una de ellas para un mismo caudal.

$$Q_C = Q_A = Q_B = \ldots = Q_n$$

$$H_R = \sum_{i=1}^{n} H_i$$

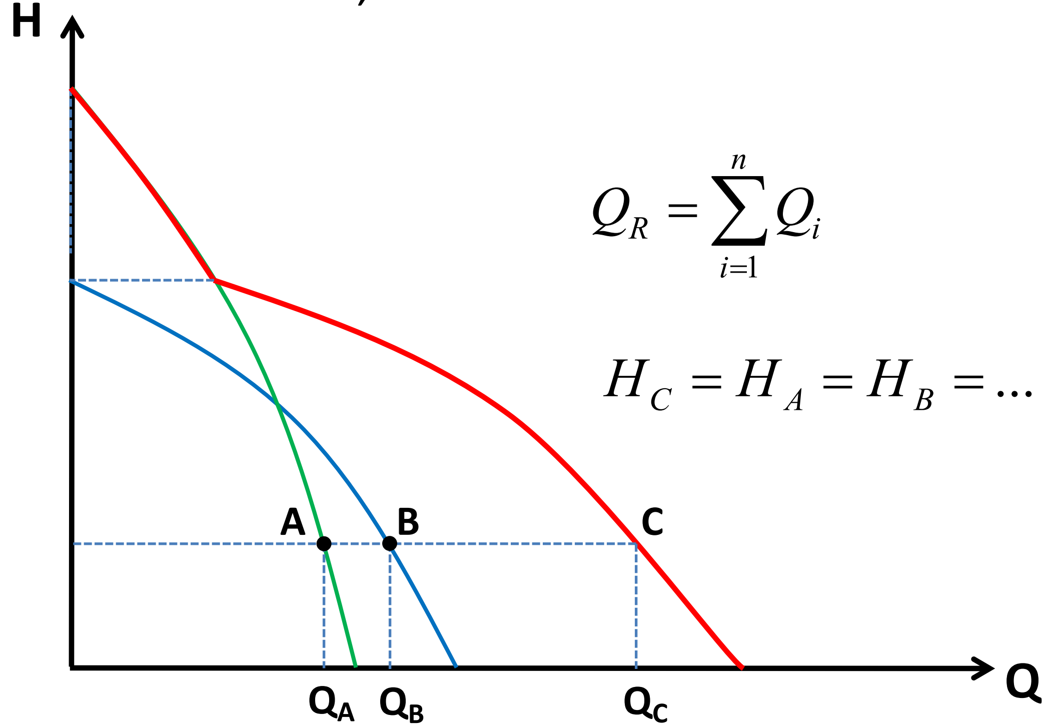


Variar la curva característica de la bomba

Cómo se hace: Acoplamiento de **bombas en paralelo**

Si el **caudal** de líquido que hay que suministrar no es alcanzable con una bomba, se pueden instalar dos (o más) en paralelo, de modo que siendo la altura suministrada por las bombas la misma, se sumen los caudales de cada una de ellas.

En este caso, la curva característica resultante del acoplamiento se obtiene mediante la suma del caudal de cada una de ellas para una misma altura.

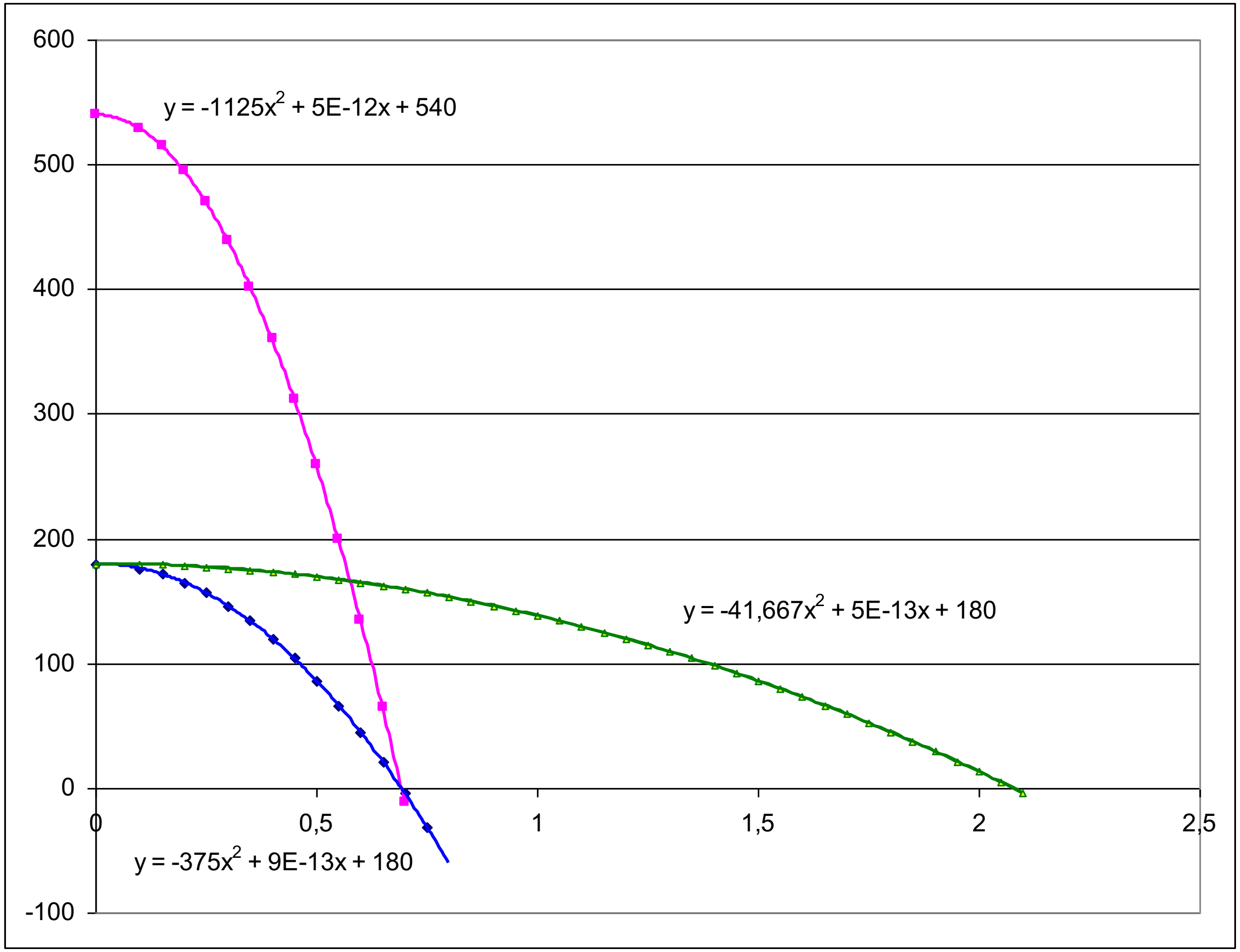


$$Q_R = \sum_{i=1}^{n} Q_i$$

$$H_C = H_A = H_B = \ldots = H_n$$

Variar la curva característica de la bomba

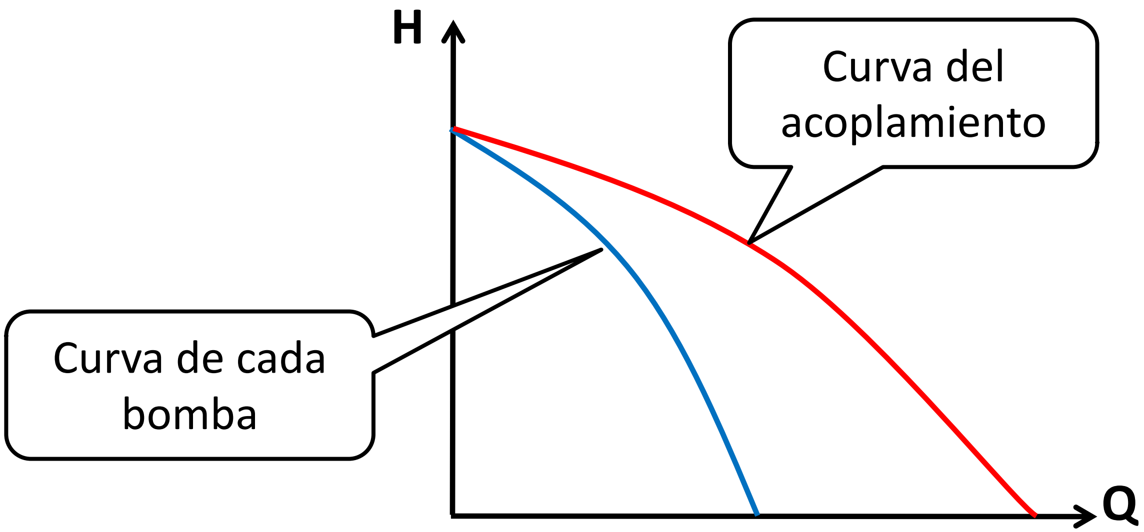
Ejemplo: Acoplamiento de tres 3 bombas



Variar la curva característica de la bomba

OJO: No confundir la curva del acoplamiento resultante con el punto de trabajo resultante.

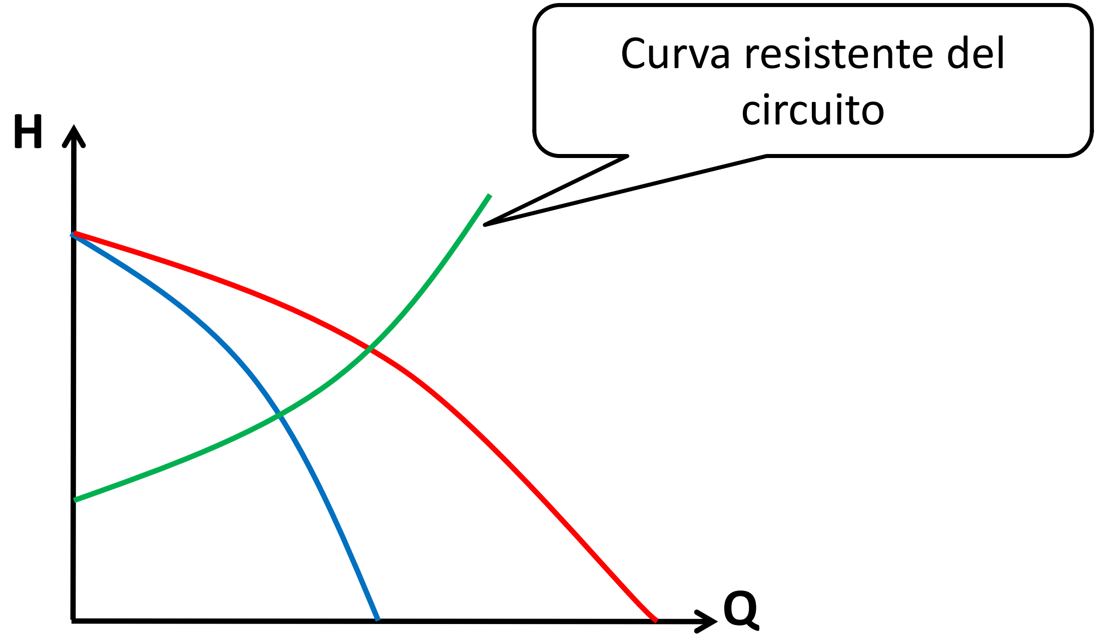
Por ejemplo, consideremos dos bombas iguales en paralelo



Variar la curva característica de la bomba

OJO: No confundir la curva del acoplamiento resultante con el punto de trabajo resultante.

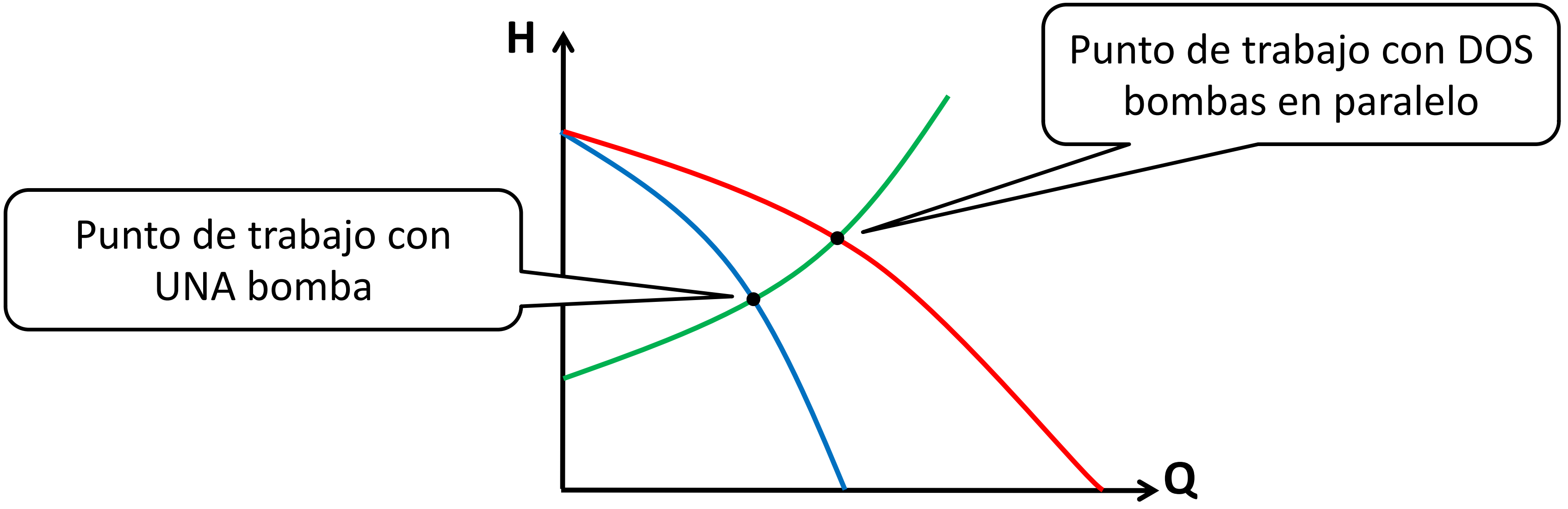
Por ejemplo, consideremos dos bombas iguales en paralelo



Variar la curva característica de la bomba

OJO: No confundir la curva del acoplamiento resultante con el punto de trabajo resultante.

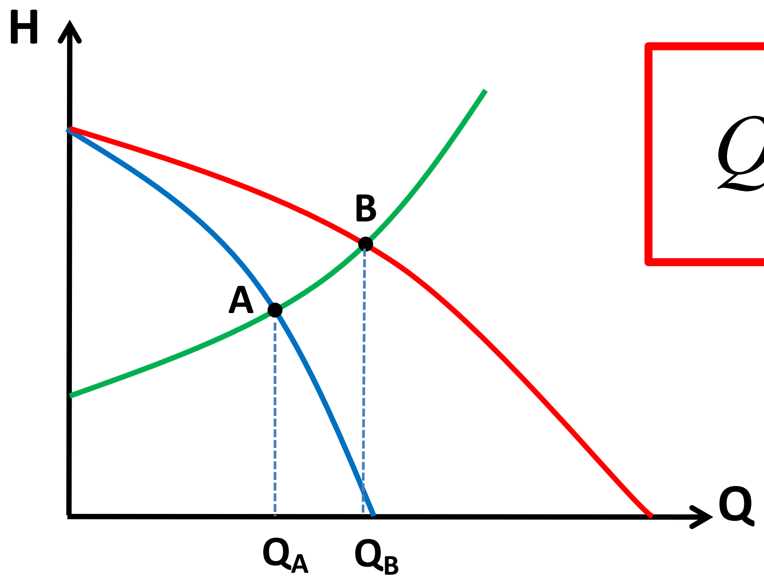
Por ejemplo, consideremos dos bombas iguales en paralelo



Variar la curva característica de la bomba

OJO: No confundir la curva del acoplamiento resultante con el punto de trabajo resultante.

Por ejemplo, consideremos dos bombas iguales en paralelo

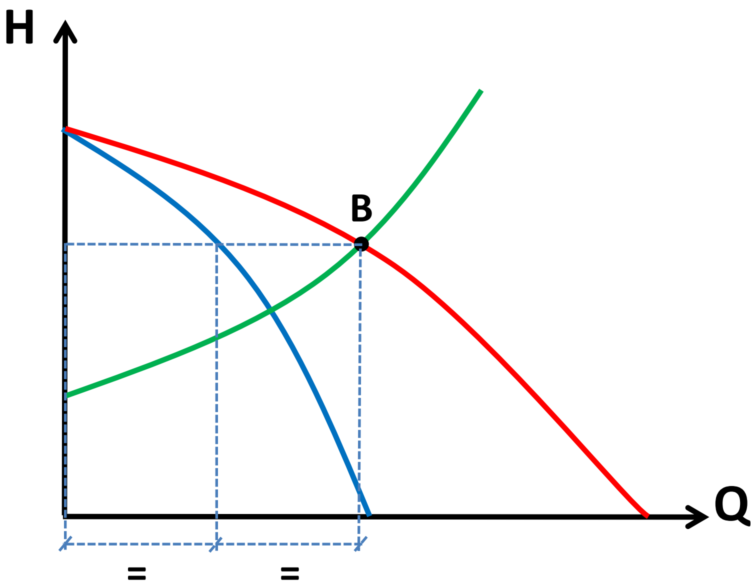


$$Q_B < 2 \cdot Q_A$$

Variar la curva característica de la bomba

Conclusión: Dos bombas iguales en paralelo **no** impulsan el doble de caudal que una sola.

Lo que sí es verdad es que dos bombas iguales en paralelo se reparten a medias el caudal impulsado.

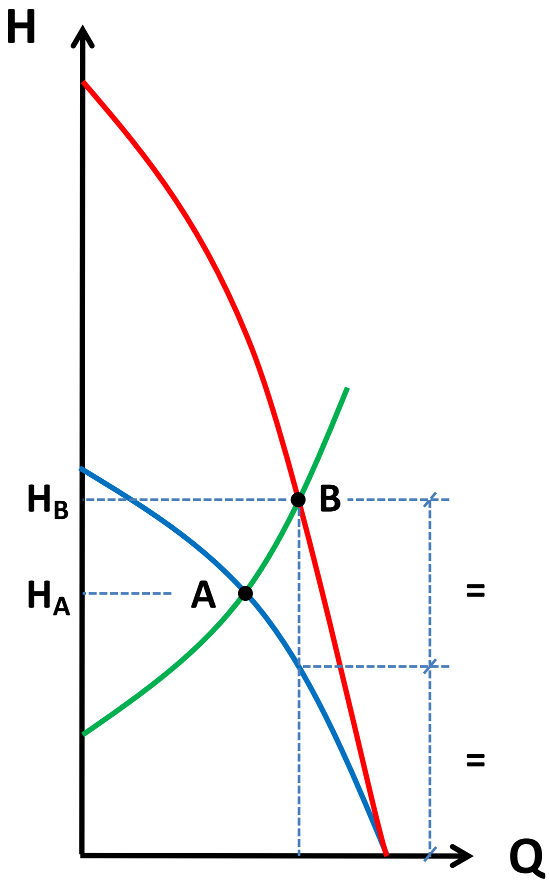


Variar la curva característica de la bomba

De igual manera, dos bombas iguales en serie **no** aportan el doble de presión que una sola.

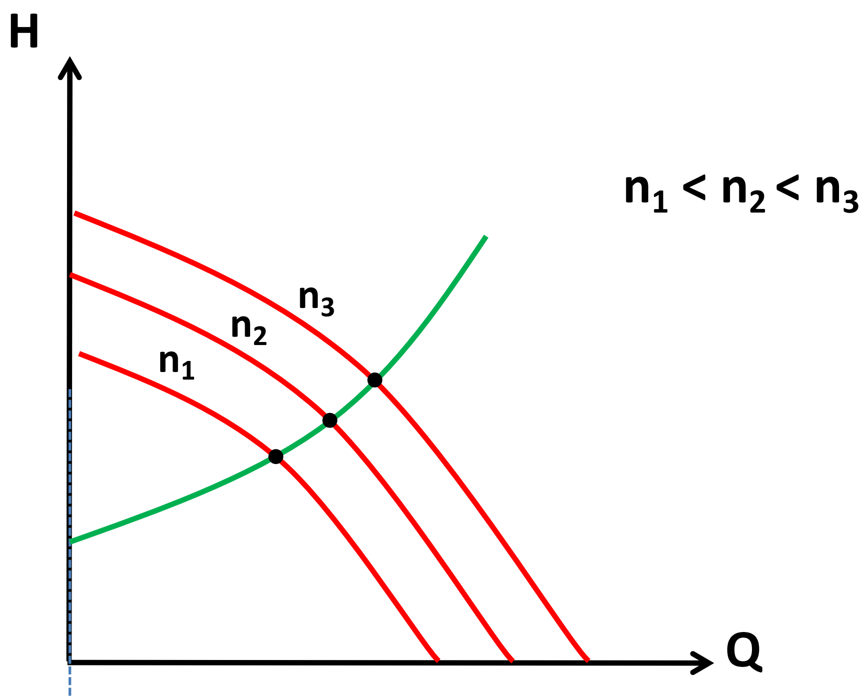
Lo que sí es verdad es que dos bombas iguales en serie se reparten a medias la presión o altura suministrada.

$$\boxed{H_B < 2 \cdot H_A}$$



Variar la curva característica de la bomba

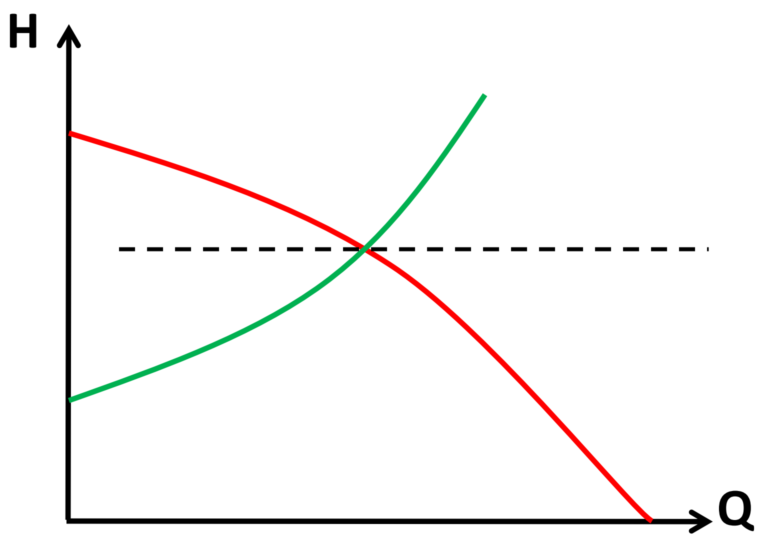
Cómo se hace: Variación de la velocidad de giro

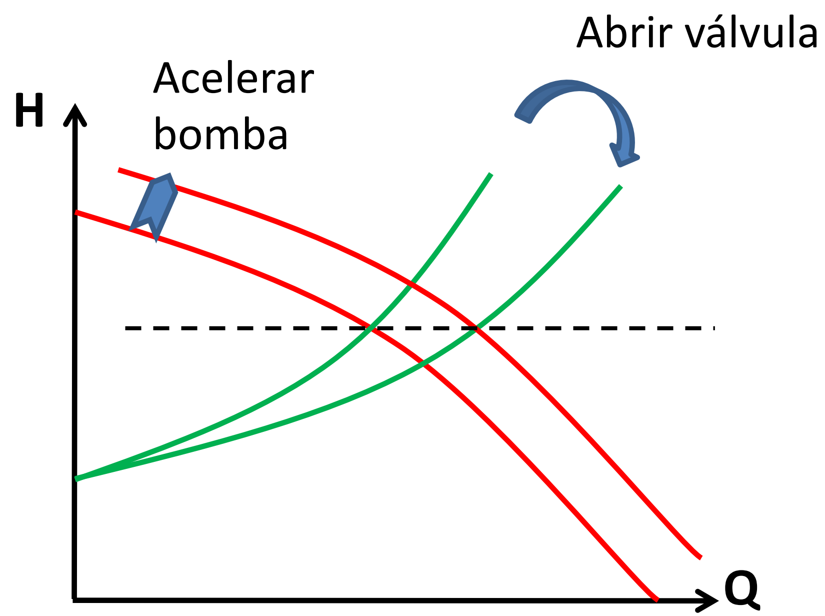


Variar la curva característica de la bomba y la curva resistente del circuito

- Regulación a presión constante

Si queremos aumentar Q manteniendo H constante, lo que haremos será abrir más la válvula de impulsión y aumentar la velocidad de giro de la bomba.

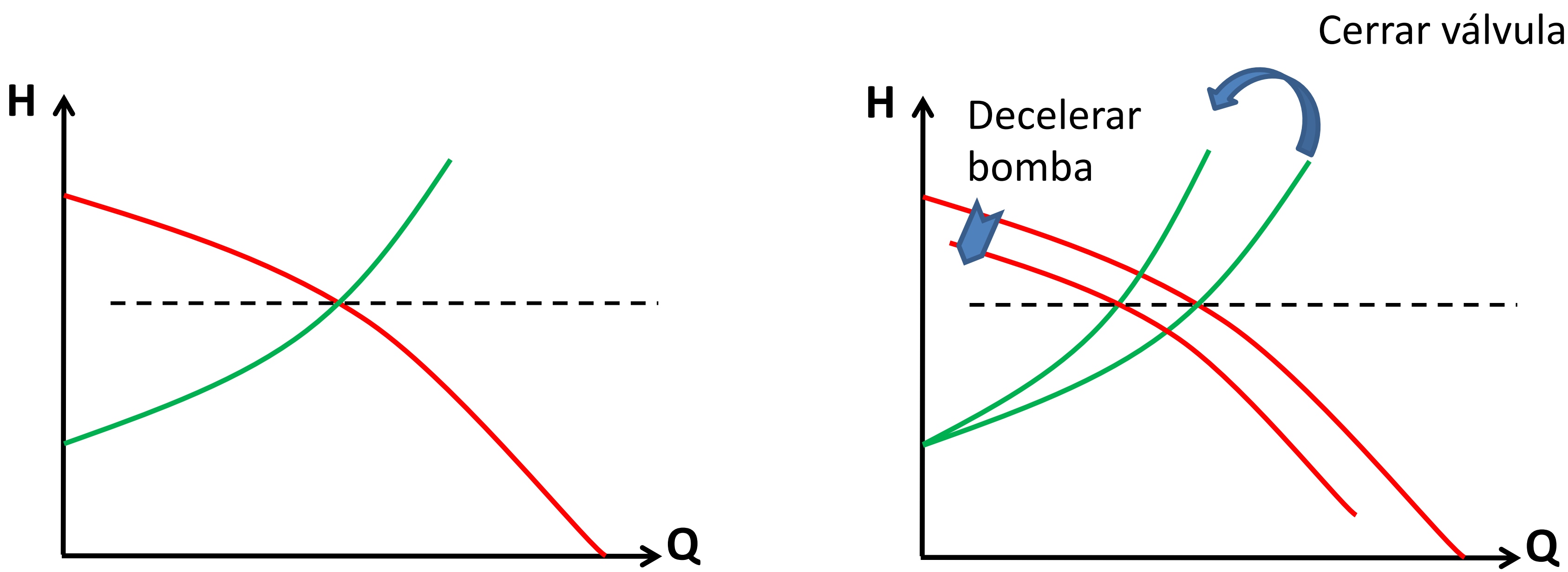




<u>Variar la curva característica de la bomba y la curva resistente del circuito</u>

- Regulación a presión constante

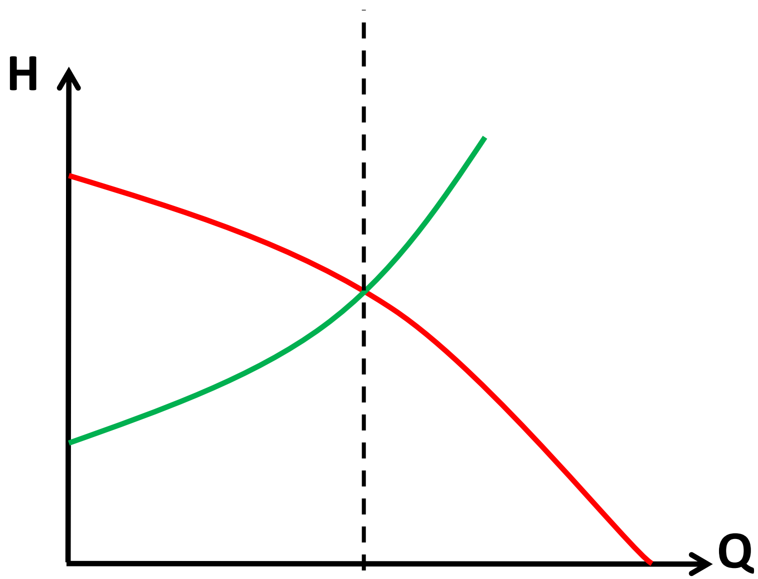
Si queremos reducir Q manteniendo H constante, lo que haremos será cerrar ligeramente la válvula de impulsión y disminuir la velocidad de giro de la bomba.

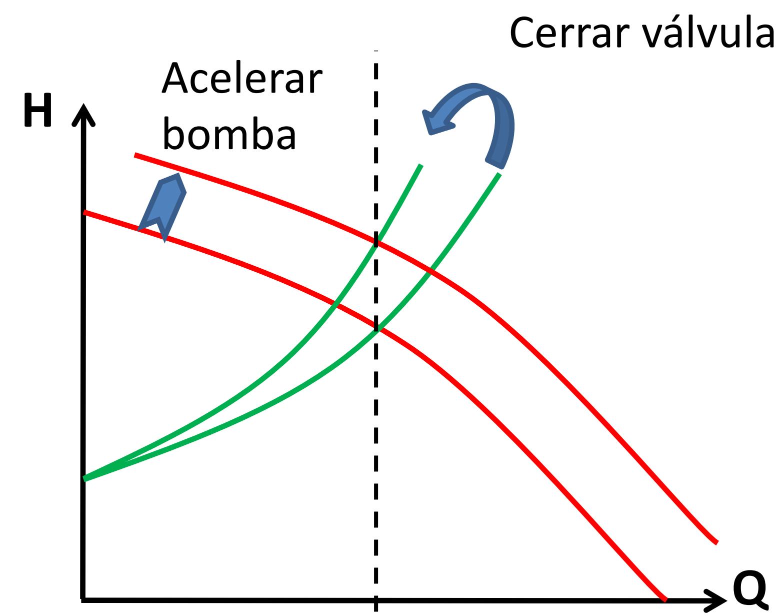


Variar la curva característica de la bomba y la curva resistente del circuito

- Regulación a caudal constante

Si queremos aumentar H manteniendo Q constante, lo que haremos será cerrar ligeramente la válvula de impulsión y aumentar la velocidad de giro de la bomba.

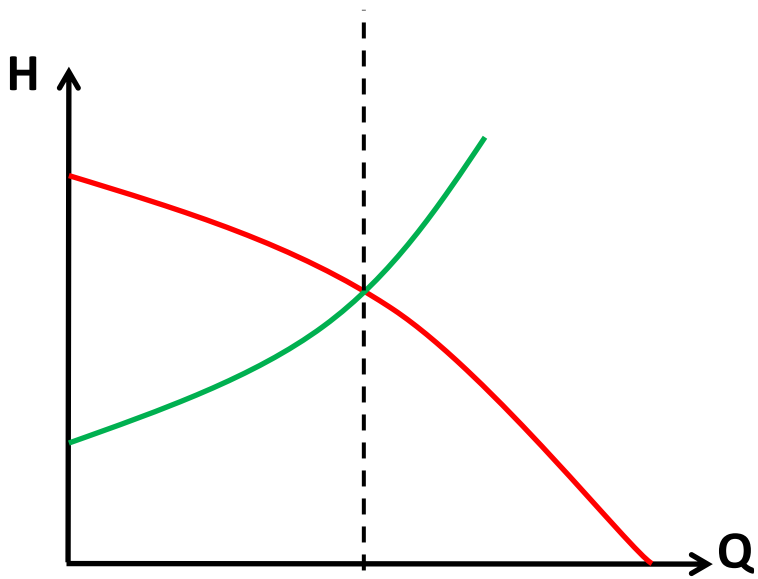


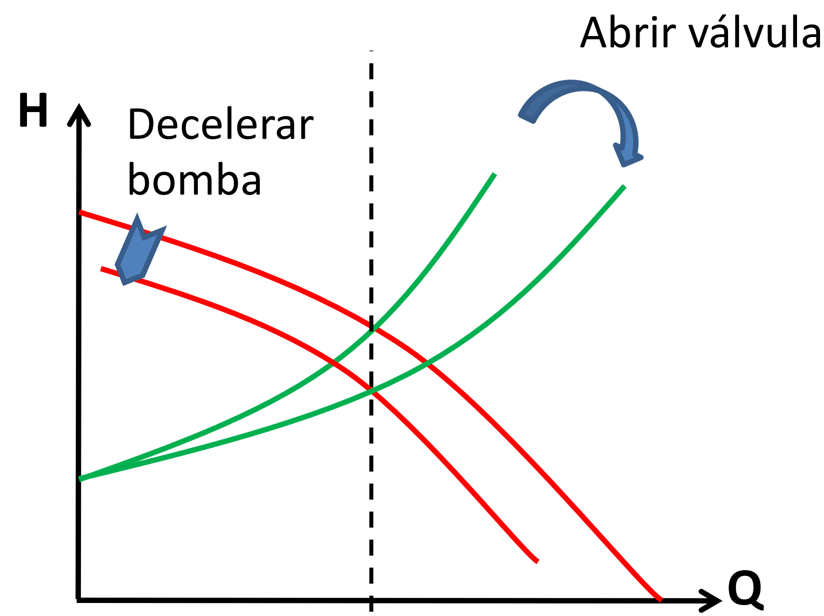


<u>Variar la curva característica de la bomba y la curva resistente del circuito</u>

- Regulación a caudal constante

Si queremos disminuir H manteniendo Q constante, lo que haremos será abrir más la válvula de impulsión y reducir la velocidad de giro de la bomba.





Leyes de semejanza en máquinas hidráulicas. Resumen

$$\frac{Q}{Q_0} = \delta \cdot \lambda^3 \qquad \frac{H}{H_0} = \delta^2 \cdot \lambda^2 \qquad \frac{P}{P_0} = \delta^3 \cdot \lambda^5$$

δ es la relación de escala cinemática (relación de velocidades de giro)

λ es la relación de escala geométrica (relación de tamaños)

Leyes de semejanza en máquinas hidráulicas.

Caso a estudiar: Variación de la velocidad de giro de una bomba (λ = 1)

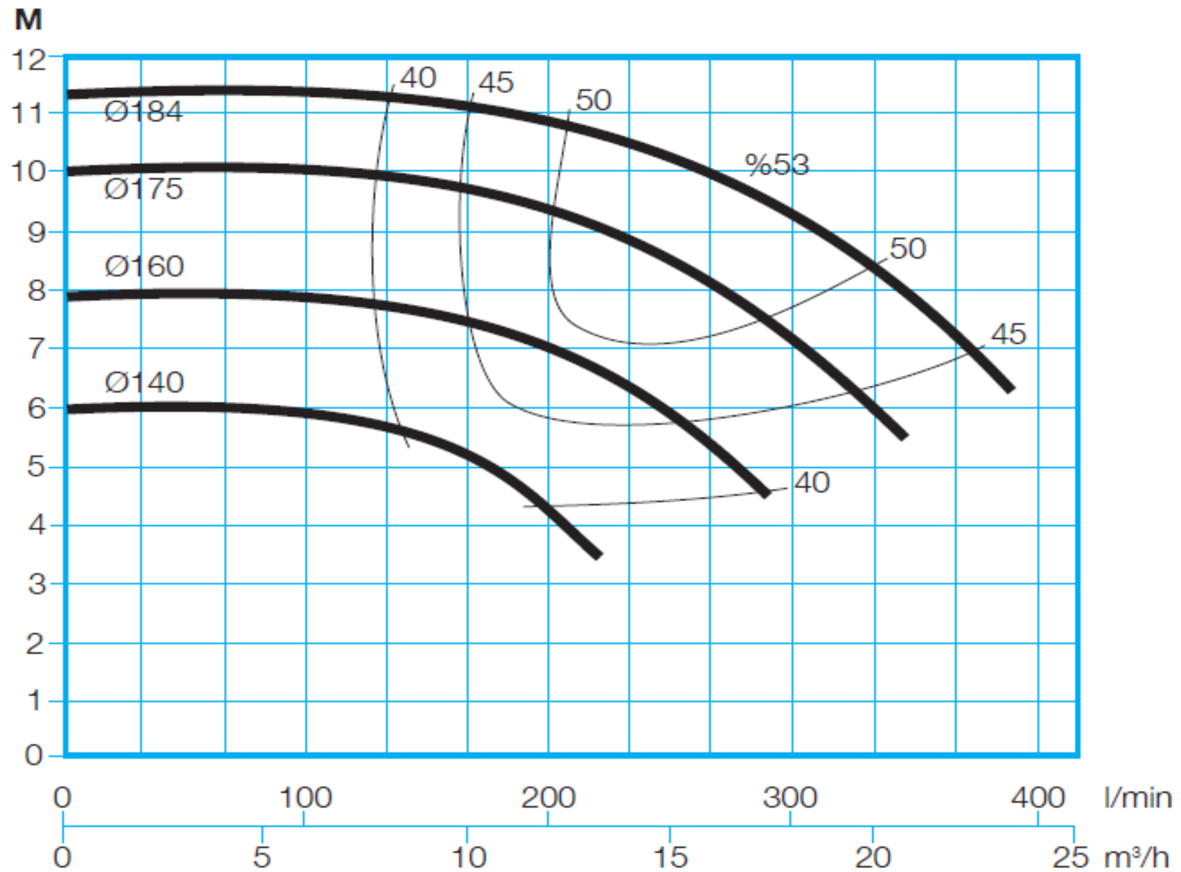
$$\frac{Q}{Q_0} = \delta \qquad \frac{H}{H_0} = \delta^2 \qquad \frac{P}{P_0} = \delta^3$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{Q}{Q_0} &= \delta \\ \frac{H}{H_0} &= \delta^2 \end{aligned}\right\} \quad \frac{H}{H_0} = \delta^2 = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2$$

$$\boxed{H = \frac{H_0}{Q_0^2} \cdot Q^2 = k \cdot Q^2}$$

Curva de semejanza

REALMENTE las parábolas de isorrendimiento se muestran como «colina» de isorrendimiento.



Fuente: www.bombasideal.com

Variación de las curvas características con la velocidad de giro:

Partiendo de:

$$H_0 = A - B \cdot Q_0 - C \cdot Q_0^2$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \delta \qquad \qquad \frac{H}{H_0} = \delta^2$$

Sustituyendo:

$$\frac{H}{\delta^2} = A - B \cdot \frac{Q}{\delta} - C \cdot \left(\frac{Q}{\delta} \right)^2$$

Es decir:

$$\boxed{H = A \cdot \delta^2 - B \cdot \delta \cdot Q - C \cdot Q^2}$$

Variación de las curvas características con la velocidad de giro:

Partiendo de:

$$\eta = D \cdot Q_0 - E \cdot Q_0^2$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \delta \qquad \frac{H}{H_0} = \delta^2$$

Sustituyendo:

$$\eta = D \cdot \frac{Q}{\delta} - E \cdot \left(\frac{Q}{\delta}\right)^2$$

Es decir:

$$\boxed{\eta = \frac{D}{\delta} \cdot Q - \frac{E}{\delta^2} \cdot Q^2}$$