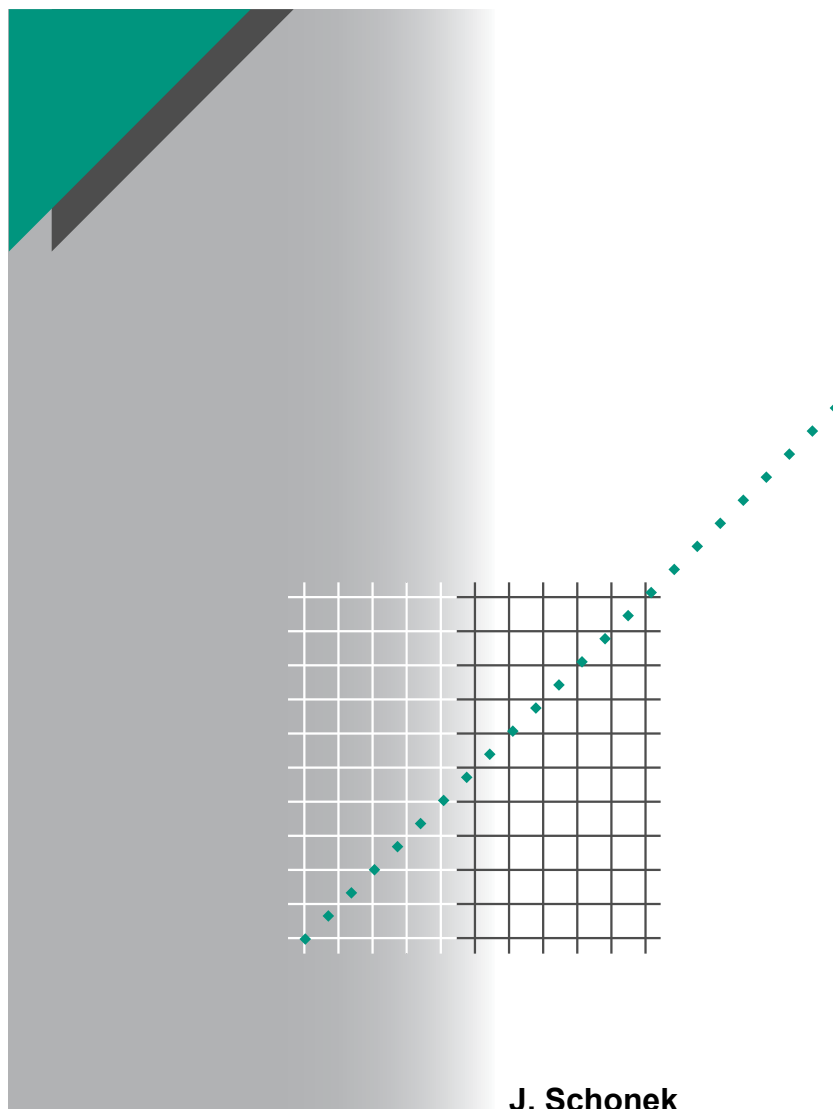


Cuaderno Técnico nº 214

Eficiencia energética: Ventajas del uso de los variadores de velocidad en la circulación de fluidos



J. Schonek

La Biblioteca Técnica constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet: www.schneider-electric.es

La colección de Cuadernos Técnicos forma parte de la «Biblioteca Técnica» de [Schneider Electric España S.A.](http://www.schneider-electric.es)

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 214 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 214

Eficiencia energética: Ventajas del uso de los variadores de velocidad en la circulación de fluidos



Jacques Schonek

Graduado en la escuela de ingeniería ENSEEIHT y doctor-ingenero por la Universidad de Toulouse, J.Schonek participó en el desarrollo de los variadores de velocidad de Telemecanique desde 1980 hasta 1995.

Posteriormente estuvo a cargo de estudios en el campo del filtrado de armónicos y a continuación de arquitecturas de distribución eléctrica.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: mayo 2008

Versión española: marzo 2010

Eficiencia energética:

Uso óptimo de energía eléctrica, incluyendo la reducción del consumo y el coste y la mejora de la disponibilidad.

Variador de velocidad:

Aparato utilizado para controlar la velocidad de una máquina.

Convertidor de frecuencia:

Aparato utilizado para ajustar la frecuencia de la tensión que se aplica a un motor y así controlar su velocidad.

Arrancador progresivo:

Aparato utilizado para limitar la corriente de arranque de un motor y para controlar su aceleración.

Bomba:

Aparato utilizado para elevar o mover un fluido.

Bomba centrífuga:

Una bomba en la que el líquido es impulsado por un movimiento giratorio.

Ventilador:

Aparato utilizado para desplazar aire.

Compresor:

Aparato utilizado para aumentar la presión de un volumen de gas.

Caudal:

La cantidad de un fluido transportado por unidad de tiempo.

Altura manométrica:

Presión en un punto determinado de un circuito, expresada como la altura de una columna de líquido.

Potencia útil:

Potencia transferida a un fluido que absorbe una cierta cantidad de energía por unidad de tiempo.

Potencia mecánica:

Potencia mecánica transferida a una máquina (bomba, ventilador y compresor) de manera que pueda aplicar una cierta cantidad de potencia útil al fluido.

Potencia eléctrica:

Energía absorbida por el motor eléctrico que acciona la máquina.

Caída de presión o pérdidas en carga:

Potencia extra que debe transferirse al fluido para vencer las fuerzas que se oponen a su circulación.

Bomba de refuerzo:

Aparato utilizado para mantener una cierta presión en un circuito, independientemente del caudal requerido.

Golpe de ariete:

Variación brusca de la presión en un circuito causada por reducción demasiado rápida del caudal, debida al cierre de una válvula o a la parada de una bomba.

Cavitación:

Fenómeno que consiste en la formación y el repentino colapso de burbujas de vapor en una bomba, ocasionado por la caída de una presión en la aspiración del líquido.

Notas:

TDH:

- Total Dynamic Head
- Altura manométrica total
- Hauteur manométric totale.

HVAC

- Heating, Ventilation and Air-conditioning
- Calefacción, Ventilación y el aire acondicionado.

Eficiencia energética: Ventajas del uso de los variadores de velocidad en la circulación de fluidos

Una gran parte de la electricidad que se produce en todo el mundo se utiliza para hacer circular fluidos, líquidos y gases de todos los tipos, con máquinas como bombas, ventiladores y compresores.

Dada la creciente importancia de controlar el consumo de energía, se debe prestar una especial atención al modo de funcionamiento de estas máquinas y a los ahorros de energía que pueden obtenerse mediante el control a velocidad variable.

En este Cuaderno Técnico se tratan los diferentes aspectos de estas aplicaciones tanto desde el punto de vista cualitativo como del cuantitativo. Los variadores de velocidad están entre las principales soluciones propuestas por Schneider Electric para aumentar la Eficiencia Energética.

Índice

1	Introducción	p. 6
2	Bombas centrífugas	
	2.1 Generalidades	p. 7
	2.2 Características fundamentales	p. 8
	2.3 Punto de funcionamiento	p. 10
	2.4 Variación de caudal a velocidad fija	p. 11
	2.5 Funcionamiento a velocidad variable	p. 14
3	Ventiladores	
	3.1 Generalidades	p. 20
	3.2 Funcionamiento a velocidad fija	p. 21
	3.3 Funcionamiento a velocidad variable	p. 23
4	Compresores	
	4.1 Generalidades	p. 26
	4.2 Funcionamiento con carga variable	p. 27
	4.3 Funcionamiento a velocidad variable	p. 27
5	Conclusión	p. 28
	Anexo 1: Bibliografía	p. 28

1 Introducción

La energía eléctrica consumida por bombas, ventiladores y compresores representa una parte significativa de la electricidad utilizada en todo el mundo. Se ha estimado que en los procesos industriales y en los grandes edificios, el 72% de la electricidad es consumida por motores, de los cuales, el 63% se utiliza en bombas, ventiladores y compresores para manejar fluidos.

Numerosos sectores industriales necesitan bombas, ventiladores y compresores. Por ejemplo:

- En el sector del Agua, para elevar, regar, distribuir, tratar, etc...
- En el sector del Petróleo y el Gas, para la extracción, transporte, refinado, licuefacción, etc.
- En los edificios, para calefacción, ventilación, aire acondicionado, etc.

Los métodos tradicionales para controlar el caudal o la presión implican variar la sección efectiva de la tubería o circuito por los que circula el fluido.

Los mecanismos más comúnmente usados son válvulas, grifos y compuertas.

No obstante se puede obtener un importante ahorro de energía usando variadores de velocidad para controlar el caudal o la presión en bombas, ventiladores y compresores como solución alternativa a las anteriormente expuestas físicas o mecánicas. En las aplicaciones de bombeo, el ahorro más importante se alcanza con bombas centrífugas.

El propósito de este documento es describir los distintos tipos de funcionamiento de las bombas, ventiladores y compresores y cuantificar el ahorro de energía que el control de velocidad puede generar. También se analizarán otras ventajas de esta técnica desde el punto de vista de la Eficiencia Energética.

2 Bombas centrífugas

2.1 Generalidades

Existen todo tipo de bombas centrífugas por lo que respecta a su potencia, caudal y presión. Se usan en multitud de aplicaciones, principalmente en el sector del Agua. Este es el tipo de bomba más extendido.

El principio implica accionar un impulsor que transfiera energía mecánica al fluido, la cual se convierte en energía de potencial (representada por la presión) y energía cinética (representada por el caudal).

La **figura 1** muestra las partes principales de una bomba centrífuga simple de un solo rodete:

- El cuerpo de la bomba, que comprende el colector de entrada y de salida.
- El impulsor, que está fijado junto al eje del motor.

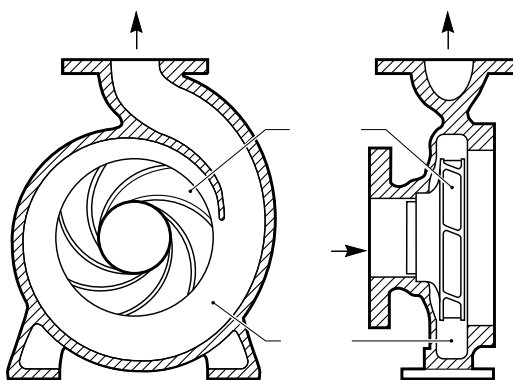


Fig. 1: Partes principales de una bomba centrífuga.

La **Figura 2** muestra una bomba centrífuga accionada por un motor asíncrono trifásico con rotor en "jaula de ardilla", que es el tipo de motor eléctrico más comúnmente utilizado.

Estos motores trabajan a una velocidad fija cuando se conectan directamente a la red eléctrica, pero están perfectamente preparados para trabajar a velocidad variable si se alimentan mediante un convertidor de frecuencia.

Se han desarrollado diferentes configuraciones de bombas centrífugas para cubrir un amplio rango de caudales y presiones. En concreto, la presión se puede aumentar colocando varias bombas en serie. La **figura 3** muestra un ejemplo de una bomba multicelular.



Fig. 2: Bomba centrífuga accionada por un motor eléctrico.



Fig. 3: Bomba centrífuga multicelular.

2.2 Características fundamentales

La misión fundamental de una bomba es entregar una cierta cantidad de fluido en un tiempo dado a una presión determinada. Por tanto, los parámetros más importantes utilizados en bombeo son **caudal** y **altura manométrica**.

El caudal (o descarga) Q representa el volumen del fluido transportado por unidad de tiempo y se expresa en m^3/s .

La altura manométrica H representa la presión en un punto determinado del circuito, expresada como la altura de una columna vertical del fluido transportado (en m).

La relación entre la altura manométrica y la presión es: $P_r = \rho \cdot g \cdot H$

P_r : presión (Pa)

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

g : aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

H : altura manométrica (m)

En el caso del agua: $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.

La **Altura Manométrica Total** de una bomba (TDH) representa la presión diferencial que crea la bomba en el fluido entre la entrada y la salida del circuito, expresada como la altura de una columna del fluido. La TDH varía según el caudal. La curva que representa la TDH como una función del caudal es característica de cada bomba.

Hay una curva de TDH distinta para cada velocidad de giro del motor de la bomba.

La **Altura Manométrica Total Máxima** ($\text{TDH}_{\text{máx}}$) es la presión máxima que la bomba puede ejercer sobre el fluido, a caudal cero, lo que corresponde a la mayor altura de la columna de fluido que la bomba puede mantener, como se ilustra en la **figura 4**.

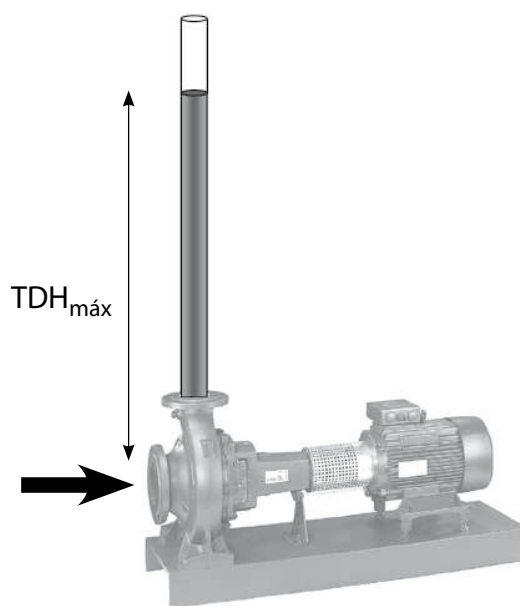


Fig. 4: Ilustración: Altura Manométrica Total máxima (TDH).

La **potencia útil** (P_u) transferida al fluido se obtiene con la fórmula:

$$P_u = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \text{ (en W)}$$

La **potencia mecánica** suministrada a la bomba tiene en cuenta el **rendimiento** η de la bomba, es decir:

$$P = \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot P_u = \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

El **rendimiento** η de la bomba varía con el caudal. Es cero cuando la TDH o el caudal son cero. Esto se debe a que no se transfiere energía al fluido.

El punto de trabajo nominal se define como el punto en el que el rendimiento de la bomba es máximo.

La **Figura 5** representa las variaciones de TDH, rendimiento y potencia en función de caudal, para una bomba centrífuga típica.

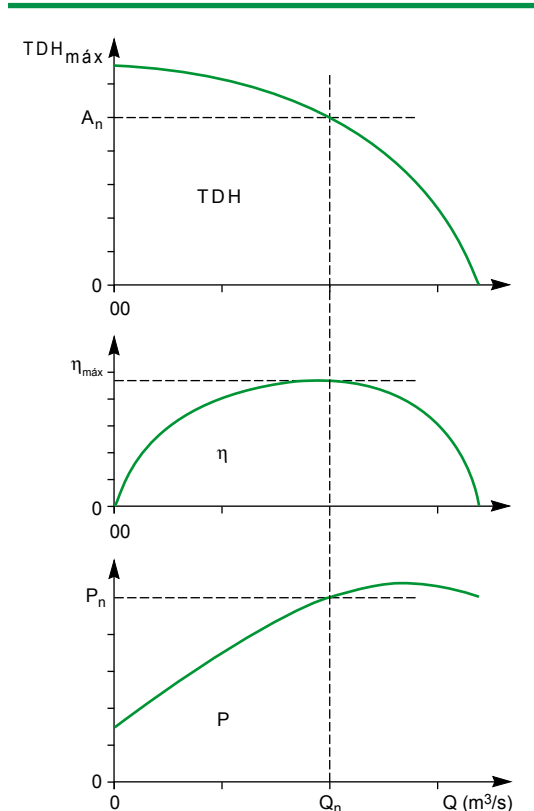


Fig. 5: Curvas características de una bomba centrífuga típica.

2.3 Punto de funcionamiento

El circuito de distribución en el que se ha instalado la bomba se caracteriza por:

- La altura de la columna de agua entre el punto de succión y el punto de utilización (altura geométrica total Z),
- La caída de presión, correspondiente a la presión adicional que se necesita ejercer sobre el fluido para superar la fricción en los conductos.

En la **figura 6** se representa un circuito de distribución simplificado.

La caída de presión R es proporcional al cuadrado del caudal. Esto da como resultado una curva que es característica de los circuitos de distribución, como la representada en la **figura 7**.

El punto de funcionamiento de la bomba instalada en el circuito se determina por la intersección de las dos curvas características: la de la bomba y la del circuito, como se indica en la **figura 8**.

En este caso, la potencia útil suministrada al fluido por la bomba (igual a $\rho \cdot g \cdot H \cdot Q$) es proporcional a la zona sombreada.

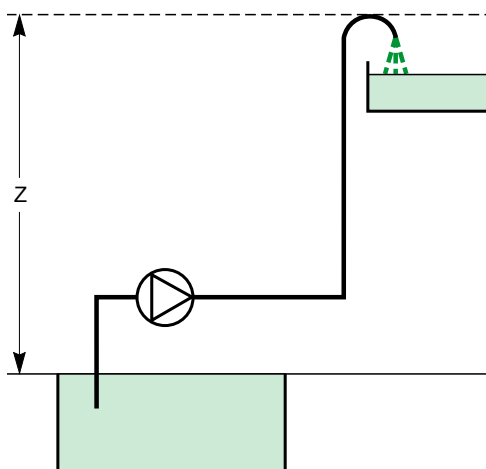


Fig. 6: Circuito de distribución simplificado.

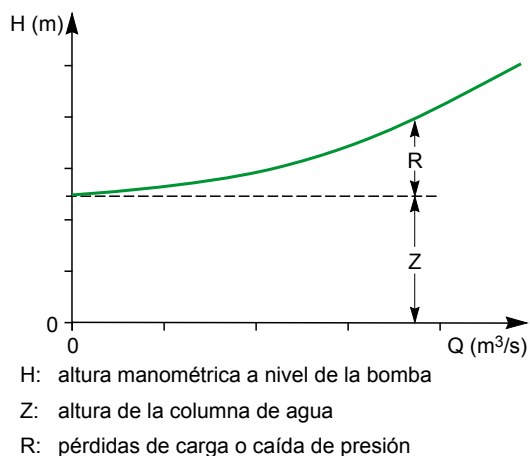


Fig. 7: Curva característica de un circuito de distribución.

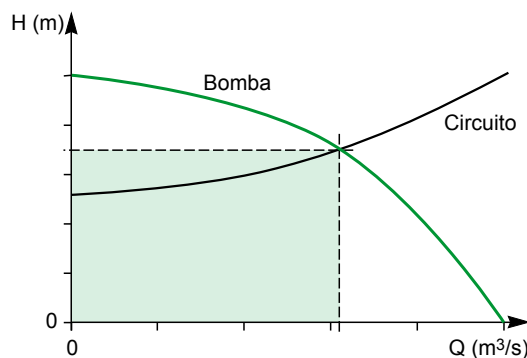


Fig. 8: Punto de funcionamiento de una bomba en un circuito.

2.4 Variación de caudal a una velocidad fija

En la mayoría de aplicaciones, el caudal de fluido a suministrar varía en el tiempo, según las necesidades de los usuarios.

Cuando se usa una bomba de velocidad fija, se pueden aplicar diferentes métodos.

Uso de válvulas aguas abajo de la bomba

Actúan reduciendo la sección efectiva de la tubería a la salida de la bomba. Esto produce un aumento de la caída de presión en el circuito, lo que se traduce en un aumento de presión a la salida de la bomba y una pérdida de energía en el fluido.

En la **figura 9**, el punto A es el punto de funcionamiento que corresponde al caudal nominal Q_n . El punto B es el punto de funcionamiento con caudal reducido Q_r . El punto de funcionamiento óptimo del circuito para este caudal Q_r sería el punto C. La zona sombreada representa la pérdida de potencia con esta forma de trabajo.

Uso de un circuito de derivación (bypass)

El principio de funcionamiento consiste en devolver a su origen una parte del fluido bombeado, utilizando una válvula de derivación o de bypass. Esto permite que el caudal esté bien

controlado pero tiene el inconveniente de una baja eficiencia energética.

En la **figura 10**, el punto A es el punto de funcionamiento correspondiente al caudal nominal Q_n . El punto óptimo de funcionamiento para este circuito con caudal reducido Q_r sería el punto C. La válvula bypass localizada a la salida de la bomba, prácticamente no altera estos puntos de funcionamiento. La zona sombreada representa la pérdida de potencia en este sistema.

Esta forma de trabajo permite conseguir un caudal bajo sin correr el riesgo de aumentar excesivamente la presión a la salida de la bomba.

Funcionamiento intermitente (marcha - paro)

Este modo de funcionamiento se usa normalmente para llenar tanques de almacenaje, como depósitos de agua. La bomba se selecciona para que trabaje con un rendimiento óptimo para la altura del agua en el circuito considerado y el máximo caudal requerido. La bomba se conecta durante los periodos en los que la energía eléctrica es más barata.

El inconveniente de este método es que, como la bomba funciona a su máximo caudal, la caída de presión en el circuito también es máxima.

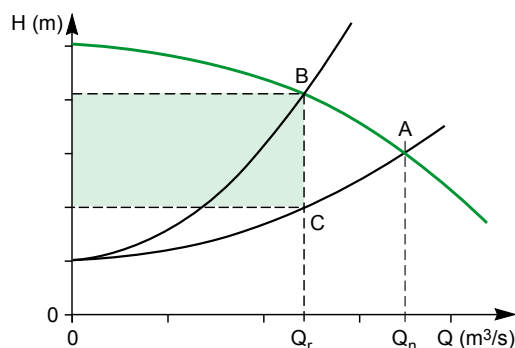


Fig. 9: Variación de caudal utilizando una válvula aguas abajo.

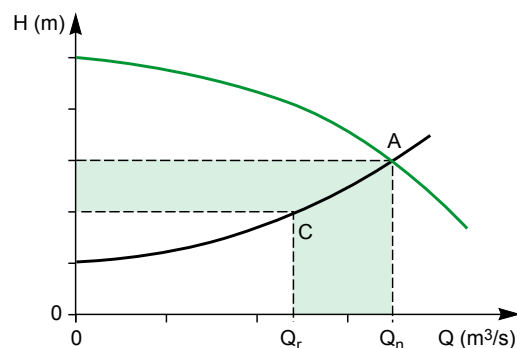


Fig. 10: Variación de caudal utilizando un circuito de derivación (válvula bypass).

Bombas en paralelo

Cuando el caudal de un circuito tiene que sufrir grandes variaciones, es conveniente instalar varias bombas en paralelo. Esta configuración, ilustrada en la **figura 11**, hace que las bombas trabajen lo más cerca posible de su nivel óptimo de eficiencia.

Si, por ejemplo, se instalan tres bombas idénticas en paralelo, la curva TDH resultante se traza sumando todos los caudales a una altura manométrica determinada.

En un circuito determinado, hay por ello tres posibles puntos de funcionamiento, dependiendo del número de bombas en marcha, como se representa en la **figura 12**.

Se pueden obtener puntos intermedios de funcionamiento usando una bomba auxiliar de menor potencia, como se ilustra en la **figura 13**.

Siguiendo el mismo principio, es bastante común usar una “bomba jockey” de baja potencia para mantener el circuito a una presión mínima cuando las bombas principales no están funcionando.

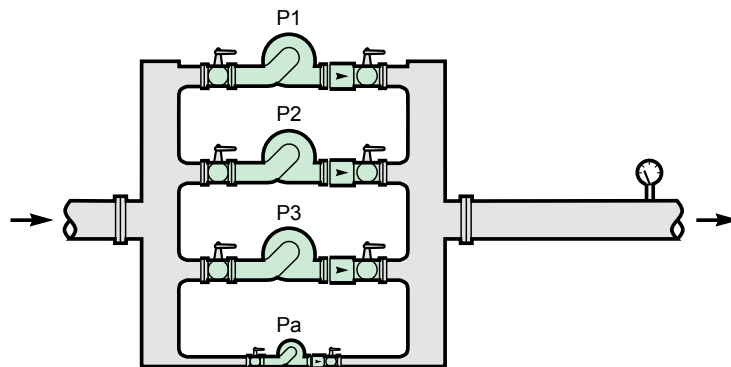


Fig. 11: Conjunto de bombas en paralelo.

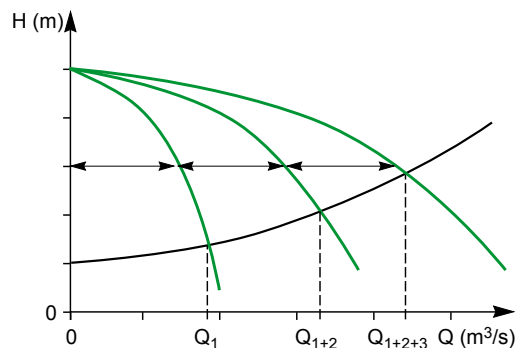


Fig. 12: Asociación de bombas idénticas en paralelo.

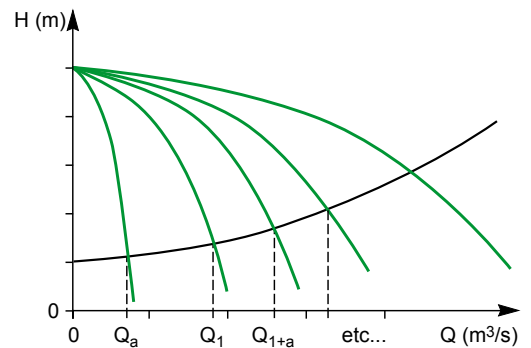


Fig. 13: Utilización de una bomba auxiliar.

Función bomba de refuerzo

Las bombas puestas en paralelo generalmente incluyen un sistema regulador de presión, para mantener la presión del circuito entre un valor mínimo y un valor máximo.

Un aumento en la demanda produce una reducción de la caída de presión, originada por la apertura de grifos aguas abajo, y la reducción de la presión.

Cuando se alcanza la presión mínima, debe ponerse en marcha una bomba más. Este funcionamiento se ilustra en la **figura 14**.

En cambio, una demanda decreciente se traduce en un aumento en la caída de presión, originada por el cierre de grifos aguas abajo, y un aumento de la presión.

Cuando se alcanza la presión máxima, se debe parar una bomba. Este funcionamiento se puede ver en la **figura 15**.

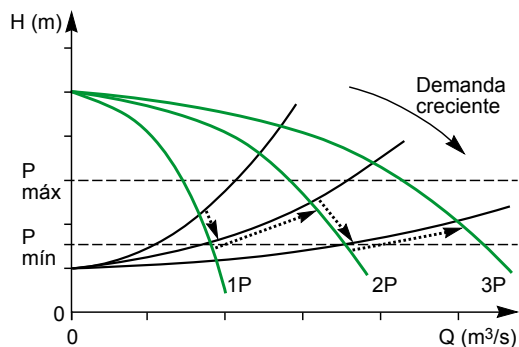


Fig. 14: Funcionamiento de una bomba de refuerzo de caudal constante.

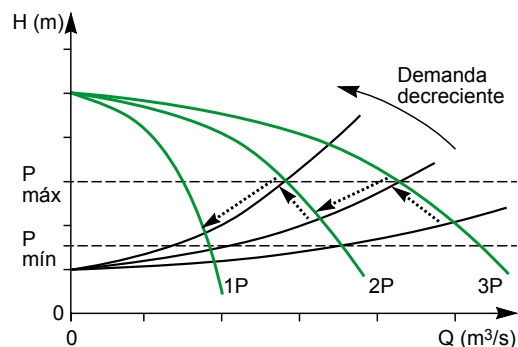


Fig. 15: Funcionamiento de una bomba de refuerzo de caudal decreciente.

2.5 Funcionamiento a velocidad variable

Las características fundamentales de una bomba centrífuga están relacionadas directamente con su velocidad de rotación. Si consideramos la bomba en sí misma (sin tener en cuenta la altura de la columna de agua), a una velocidad con giro N , diferente de la velocidad nominal N_n :

- el caudal Q es proporcional a (N/N_n) ,
- la altura manométrica (TDH) es proporcional a $(N/N_n)^2$,
- la potencia P es proporcional a $(N/N_n)^3$.

Nota: Estas reglas sobre las bombas son aproximadas, pero se cumplen en un amplio rango de variación de velocidad.

A partir de la curva característica a velocidad nominal, la curva característica de TDH (Q) a

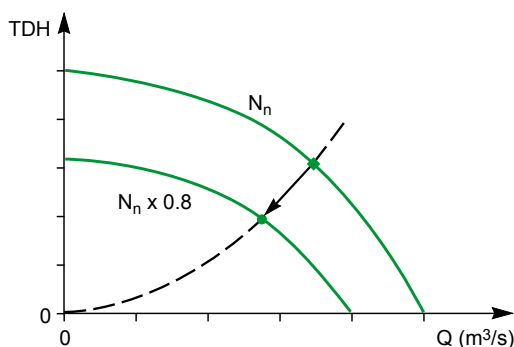


Fig. 16: Características de una bomba centrífuga para dos valores de velocidad.

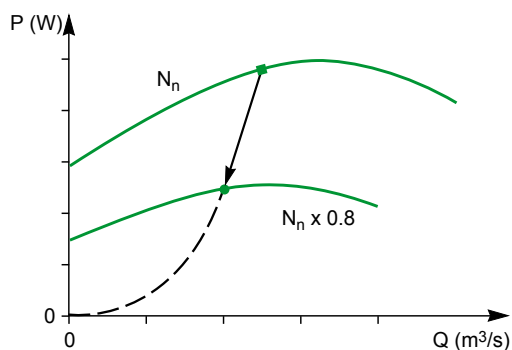


Fig. 17: Características $P(Q)$ de una bomba centrífuga para dos valores de velocidad.

otra velocidad diferente puede trazarse, punto a punto, situando los puntos homólogos en una parábola, como se ilustra en la **figura 16**.

De forma semejante, la curva característica $P(Q)$, puede trazarse, punto a punto, con puntos homólogos localizados en una curva cúbica, como se puede ver en la **figura 17**.

Variación del caudal en un circuito determinado

Como se ha visto antes, es posible variar el caudal de una bomba a velocidad fija utilizando una válvula colocada aguas abajo. Este tipo de funcionamiento se puede ver en la **figura 9**.

La **figura 18** representa la reducción de la potencia alcanzada cuando el caudal se varía alterando la velocidad de giro de la bomba. La potencia útil suministrada por la bomba es proporcional a las áreas rectangulares sombreadas; se evidencia una reducción significativa de potencia en la configuración de velocidad variable.

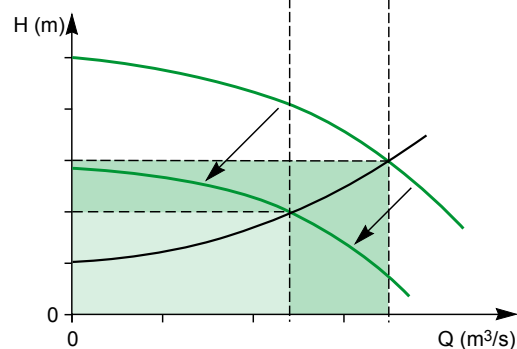
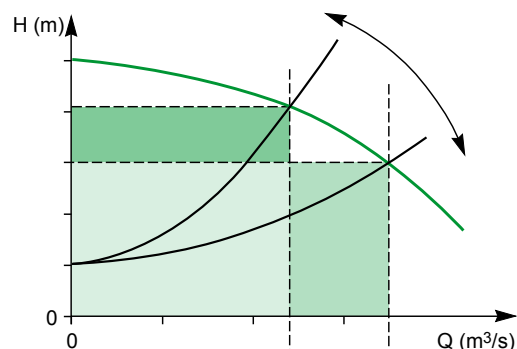


Fig. 18: Variación de caudal a velocidad constante y a velocidad variable.

Variar la velocidad de giro permite usar la bomba siempre en su nivel de eficiencia más alto. En este caso, las áreas rectangulares sombreadas son directamente proporcionales a la potencia absorbida por la bomba. En la **figura 19** se muestra el modo en que varía la potencia absorbida en este ejemplo.

Variación de potencia en diferentes tipos de circuitos

La variación de potencia absorbida por la bomba en función del caudal depende de las características del circuito en el que se utiliza. El parámetro que tiene que tenerse en cuenta es la relación entre la presión en el punto de funcionamiento nominal de la bomba y la presión Z a caudal cero (ver **figura 7**).

Tomando H_n como la TDH en el punto de funcionamiento nominal de la bomba, se pueden definir los siguientes tipos de circuitos diferentes:

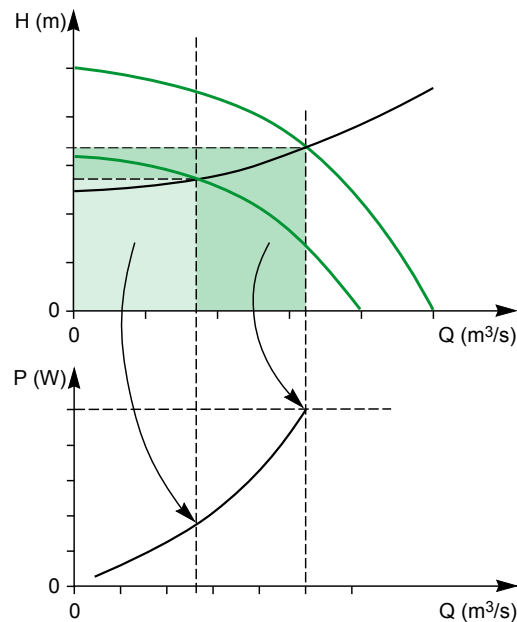


Fig. 19: Variación de la potencia a velocidad variable.

- $Z = 0$: circuito sólo con caídas de presión,
- $Z = 0,85 H_n$: suministro típico de agua (la altura geométrica es un factor preponderante),
- $Z = 0,5 H_n$: valor intermedio.

La parte superior de la **figura 20** muestra que, para obtener una reducción similar en el caudal de Q_n hasta Q_r , la disminución de velocidad de la bomba será diferente dependiendo del tipo de circuito. De ahí se deducen diferentes curvas de potencia en función del caudal, como se muestra en la gráfica inferior de la misma figura. Cuanto más disminuya la velocidad, mayor será la reducción de potencia.

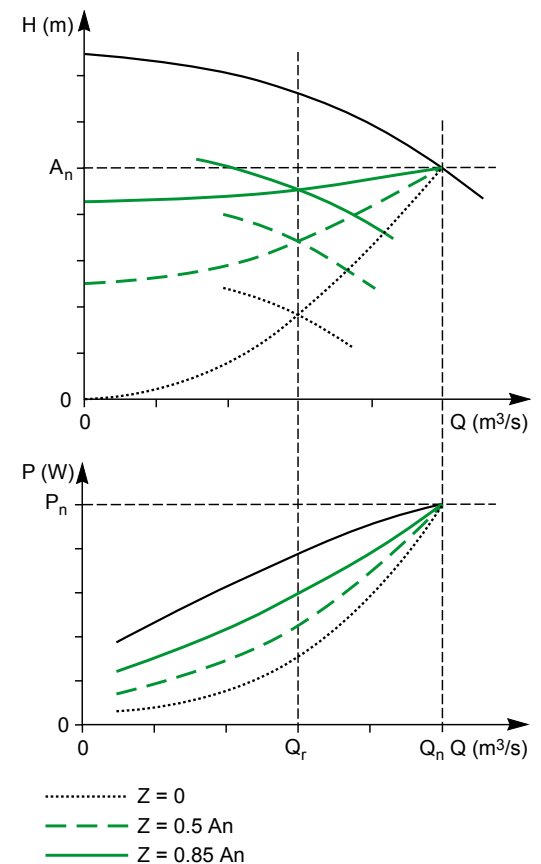


Fig. 20: Variación de la potencia para diferentes tipos de circuitos.

Ejemplo del cálculo de la reducción de potencia

Vamos a considerar una motobomba con una potencia de 100 kW colocada en un circuito con una caída de presión Z igual a la mitad de la altura manométrica nominal de la bomba ($Z = 0,5 H_n$).

Se desea comparar la energía consumida con el 80% del caudal nominal cuando la bomba se utiliza a su velocidad nominal o a velocidad reducida. Se ha montado una válvula aguas abajo para reducir el caudal a velocidad nominal.

Rendimiento del motor:

$\eta_{\text{motor}} = 0,95$ a velocidad nominal,

$\eta_{\text{motor}} = 0,93$ al 80% de la velocidad nominal.

Rendimiento del variador de velocidad:

$\eta_{\text{variador}} = 0,97$.

La potencia absorbida en cada caso se ha indicado en la figura anterior y se concreta en la **figura 21**.

Con un caudal del 80% del nominal, la potencia absorbida a velocidad nominal es el 94% de la potencia nominal.

Con este mismo caudal, la potencia absorbida a velocidad reducida es el 66% de potencia la nominal.

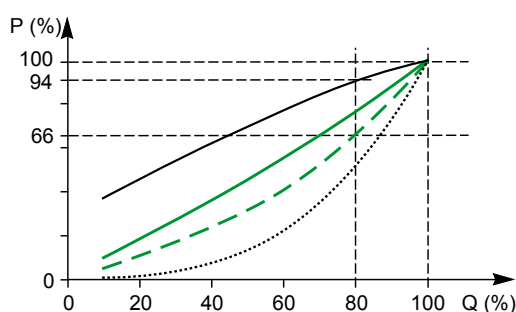


Fig. 21: Variación de potencia.

La potencia eléctrica a velocidad nominal:

$$P_r = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{\text{motor}}} \cdot P(Q) = 100 \cdot \frac{1}{0,95} \cdot 0,94 = 98,9 \text{ kW}$$

Potencia eléctrica a velocidad reducida:

$$P_r = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{\text{motor}}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{variador}}} \cdot P(Q) =$$

$$= 100 \cdot \frac{1}{0,93} \cdot \frac{1}{0,97} \cdot 0,66 = 73,1 \text{ kW}$$

La diferencia en el consumo de potencia es de 25,8 kW, lo que representa un ahorro de energía de 226 MWh al año suponiendo un trabajo continuo y un ahorro de 11 300 € por año, suponiendo un coste de 0,05 €/kWh.

Programa Eco8

Este software de aplicación de Schneider Electric permite estimar, para los casos generales, el ahorro de energía que puede conseguirse variando la velocidad en lugar de utilizar las técnicas tradicionales, como estrangular el caudal con válvulas aguas abajo o usar circuitos bypass.



Fig. 22: Programa Eco8.

Reducción de potencia respecto al funcionamiento en régimen intermitente (marcha - paro)

El uso intermitente de una bomba de velocidad fija se ha presentado como una posible solución para el ajuste del caudal medio en un circuito.

Vamos a poner un ejemplo del ahorro que puede conseguirse variando la velocidad.

Consideremos un circuito cuya altura manométrica a caudal cero, Z , es igual a la mitad de la altura manométrica nominal de la bomba; o sea: $Z = 0,5 \cdot H_n$.

La altura manométrica en el circuito, en función del caudal, es:

$$H = Z + k1 \cdot Q^2 \quad (1)$$

Si Q_n es el caudal nominal de la bomba, se obtiene:

$$H_n = Z + k1 \cdot Q_n^2, \text{ con } Z = 0,5 \cdot H_n$$

$$\text{siendo } k1 = \frac{0,5 H_n}{Q_n^2} \quad (2).$$

Sustituyendo en la ecuación (1), se obtiene:

$$H = 0,5 H_n \left(1 + \left(\frac{Q}{Q_n} \right)^2 \right) \quad (3)$$

Se supone que el caudal deseado es la mitad del caudal nominal. En el caso de una bomba a velocidad fija, ésta requiere arranques y paradas a potencia nominal, con un ciclo de 1/2.

La potencia media necesaria vendrá dada por:

$$P_{\text{media}} = k \cdot \frac{1}{2} \cdot H_n \cdot Q_n$$

El coeficiente k tiene en cuenta el rendimiento de la bomba, que se supone óptimo en el punto de trabajo nominal ($H_n \cdot Q_n$).

Cuando se utiliza con velocidad reducida, la potencia es:

$$P_r = k \cdot H \cdot \frac{Q_n}{2}$$

Podemos usar el mismo coeficiente k si asumimos que la bomba trabaja a una velocidad reducida y a su nivel óptimo de rendimiento.

La altura manométrica H se puede calcular usando la ecuación (3) con $Q = Q_n/2$, obteniéndose:

$$P_r = \left(\frac{5}{8} \right) \cdot k \cdot \frac{1}{2} \cdot H_n \cdot Q_n$$

obteniéndose: $P_r = 0,62 \cdot P_{\text{med}}$

Por tanto, el uso de una bomba trabajando a velocidad reducida permite, en este ejemplo, que la potencia absorbida se reduzca cerca de un 40%, sin tener en cuenta las pérdidas en el motor y en el variador de velocidad.

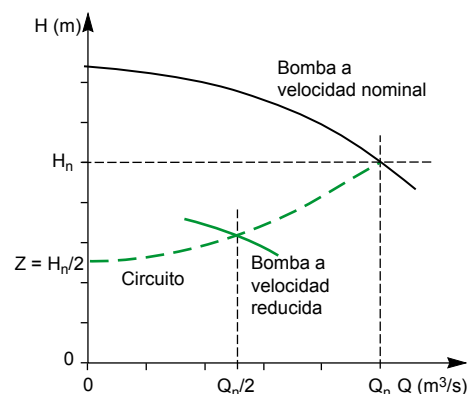


Fig. 23: Características de la bomba y del circuito.

Bombas en paralelo con velocidad variable

El trabajo de una configuración multibomba presentada anteriormente (ver figura 11) puede mejorarse significativamente utilizando además un sistema con velocidad variable.

La configuración más comúnmente usada, implica variar la velocidad de una bomba y usar las otras a velocidad fija. El uso de una bomba de velocidad variable permite cubrir el rango entero (H, Q), como se ilustra en la figura 24.

La utilización de una bomba con velocidad variable permite mantener la presión en el circuito en un valor predeterminado. Si la presión cae o aumenta respecto al valor predeterminado, se envía una orden de aceleración o desaceleración al variador de velocidad. Si se alcanza la velocidad máxima o mínima de la bomba, una de las bombas de velocidad fija arrancará o se parará, según el caso.

Con una bomba de velocidad variable se consigue además evitar grandes diferencias de presión, como las que se representan en las figuras 14 y 15.

Este sistema también permite una reducción en el número de arranques y paradas de los motores al evitar los grandes cambios de presión o fluctuaciones de caudal, lo que ocurre cuando una bomba de velocidad fija arranca o para. Esto reduce la sobrecarga en los motores y el riesgo de un golpe de ariete.

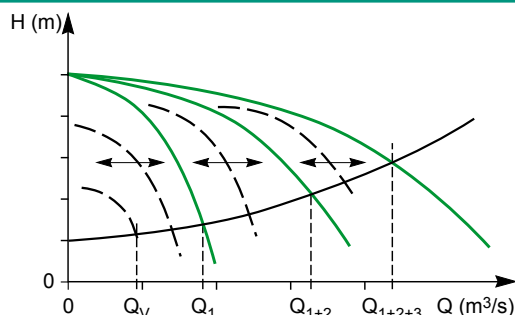


Fig. 24: Utilización de una bomba a velocidad variable.

Comparación de las diferentes soluciones

En el siguiente ejemplo, se comparan las diferentes opciones para la reducción del caudal:

- estrangular, mediante la utilización de válvulas,
- una bomba girando a una velocidad variable (bomba principal) y otras bombas girando a velocidad fija,
- todas las bombas girando a una velocidad variable.

Consideremos una configuración con 3 motobombas idénticas en paralelo, cada una con una potencia de 100 kW, con el 100% del caudal. La altura manométrica estática Z del circuito es la mitad de la altura manométrica total ($Z = 0,5 H_n$).

La comparación de las diferentes opciones se hace al 70% de la capacidad total, o sea, el 210% del caudal nominal de cada bomba sola.

Las curvas características de las bombas se representan en la **figura 25**, para diferentes valores de velocidad de giro.

Utilizando válvulas de reducción (estrangulamiento), la potencia de cada bomba, girando a su velocidad máxima, se reduce a 85 kW. La potencia total es entonces 255 kW.

En la **figura 26** se ve el funcionamiento con una bomba principal a una velocidad reducida. Como

consecuencia, el caudal de una bomba, girando a máxima velocidad, aumenta a 130%, con un aumento de potencia absorbida de alrededor de un 7%. Como el caudal total solicitado es el 210% del caudal nominal de una única bomba, sólo se necesita una bomba girando a velocidad máxima.

El caudal impulsado por la bomba principal es entonces igual a $210 - 130 = 80\%$ de caudal nominal.

Para este caudal y altura manométrica, la bomba está girando aproximadamente al 87% de su velocidad nominal y la potencia absorbida es de alrededor de 66 kW.

Para esta opción, la potencia total es igual a $107 + 66 = 173$ kW.

Con las tres bombas girando a la misma velocidad reducida, su velocidad se debe ajustar al 85% de su velocidad nominal. La potencia de cada bomba se reduce a 60 kW.

La potencia total en esta opción es entonces igual a $3 \times 60 = 180$ kW.

Se puede concluir que el uso de velocidad variable produce una significativa reducción de la potencia total.

En el ejemplo presentado aquí, la mejor eficiencia se obtiene con una sola bomba a velocidad variable, pero la bomba a velocidad fija debe sobredimensionarse.

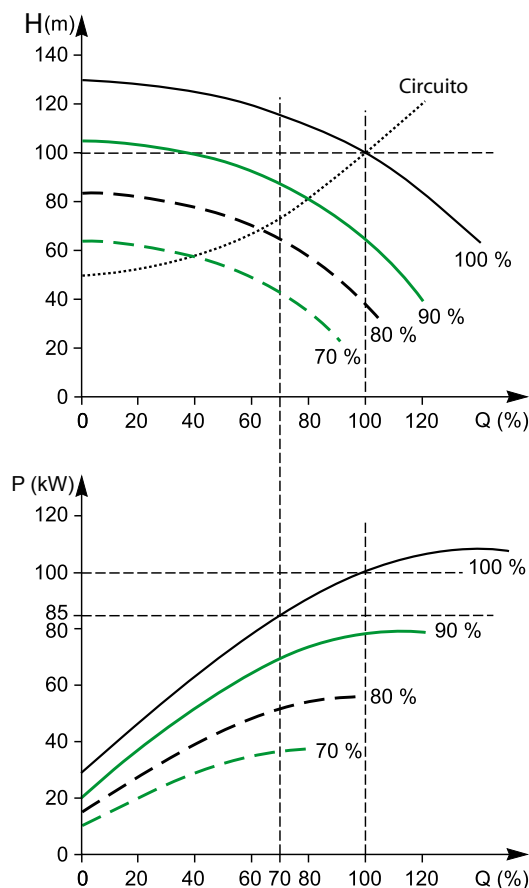


Fig. 25: Características de las bombas y del circuito.

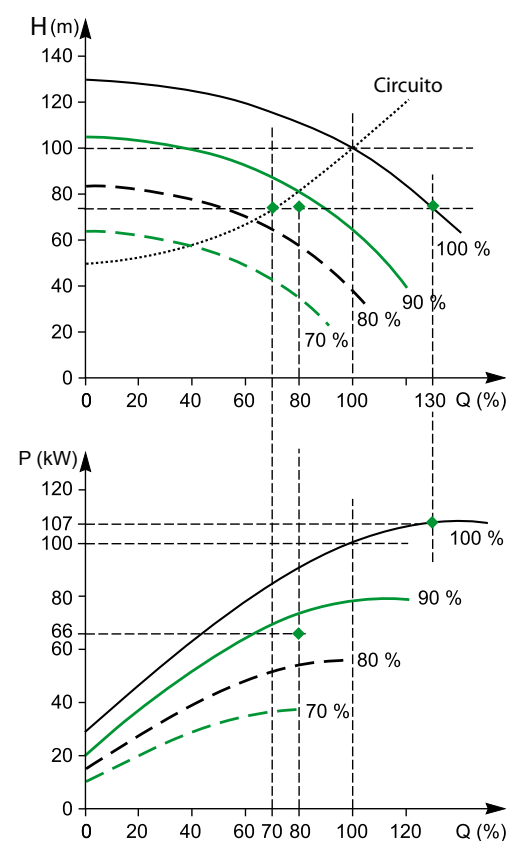


Fig. 26: Utilización de una bomba a velocidad variable.

Otras ventajas de la variación de velocidad

Además de las ventajas citadas, el uso de variadores de velocidad permite una mayor flexibilidad en el diseño y la puesta en marcha de las instalaciones. En particular permite:

- La eliminación de las válvulas para ajustar el caudal máximo: si la bomba está sobredimensionada, el trabajo a velocidad reducida permite evitar las pérdidas de energía causadas por una válvula estranguladora de caudal.
 - La reducción de ruido y vibraciones: el uso de un variador de velocidad significa que la bomba no tiene que utilizarse durante largos periodos a velocidad fija, lo que puede causar resonancia en las tuberías.
 - Menor riesgo de golpe de ariete y cavitación: estos fenómenos, que surgen como resultado de variaciones rápidas de la velocidad de la bomba, se evitan gracias a las aceleraciones y desaceleraciones graduales que producen los variadores de velocidad.
 - La sustitución de motores de dos velocidades y de otros aparatos de control de velocidad obsoletos que ofrecen un rendimiento menor.
 - La vida del rodete de una bomba está relacionada con su velocidad tangencial. Por lo tanto, reducir la velocidad del motor mejorará la fiabilidad de los mecanismos de impulsión.
 - El control de la velocidad permite a la bomba funcionar con un rendimiento máximo y aumenta la esperanza de vida de rodamientos y juntas.
- Para alimentar estos motores a velocidad variable, Schneider Electric ofrece la gama Altivar 61, de variadores de velocidad, que se ha diseñado especialmente para aplicaciones de bombeo.

Las tarjetas electrónicas disponibles como opción permiten un control óptimo en aplicaciones complejas.

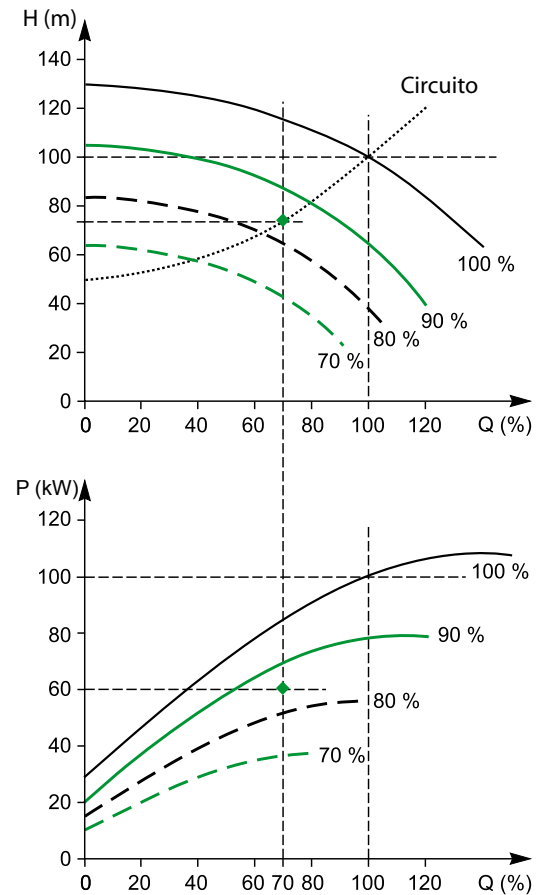


Fig. 27: Utilización de tres bombas a velocidad variable.



Fig. 28: Gama de variadores de velocidad Altivar 61 de Schneider Electric.

3 Ventiladores

3.1 Generalidades

Los ventiladores son máquinas diseñadas para impulsar un fluido gaseoso con poca compresión. Están gobernados por las mismas leyes de la mecánica de fluidos que se aplican a las bombas centrífugas, por lo que existen numerosas analogías entre los dos tipos de máquinas.

Hay muchas configuraciones diferentes de ventiladores. La figura 29 presenta dos ejemplos de esto: un ventilador centrífugo o radial y un ventilador helicoidal o axial.

La presión diferencial creada por el ventilador puede ser expresada como la altura geométrica del fluido, como en el caso de las bombas.

La figura 30 muestra la relación entre la altura manométrica H y la potencia P , en el caso del ventilador centrífugo, varía en función del caudal Q , a una velocidad con giro constante.

En la mayoría de los casos, el circuito de salida no presenta una presión diferencial notable (los circuitos de entrada y de salida están los dos a presión atmosférica).

La forma de la curva característica del circuito se puede explicar por las caídas de presión que son proporcionales al cuadrado del caudal. La curva $H(Q)$ del circuito es, por tanto, una parábola que pasa por el origen. El punto de funcionamiento de un ventilador instalado en un circuito se determina por la intersección de dos curvas características la del ventilador y la del circuito, como se indica en la figura 31.

El área de la izquierda del pico de la curva característica debe evitarse, porque presenta riesgo de inestabilidad y podría llevar a oscilaciones de caudal y de presión, así como a un ruido anormal y un estrés mecánico considerable.

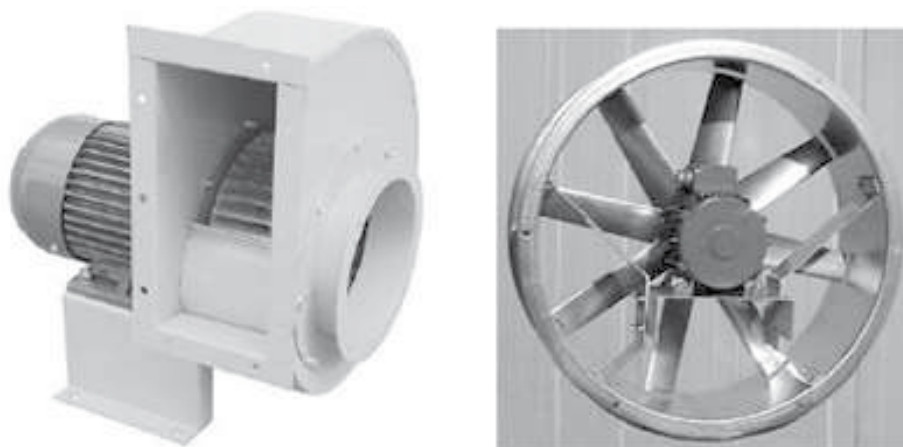


Fig. 29: Ejemplo de ventiladores: centrífugo (a la izquierda) y helicoidal (a la derecha), con sus motores de arrastre.

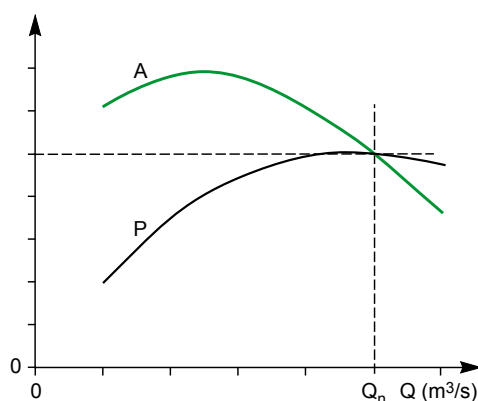


Fig. 30: Características típicas de un ventilador centrífugo.

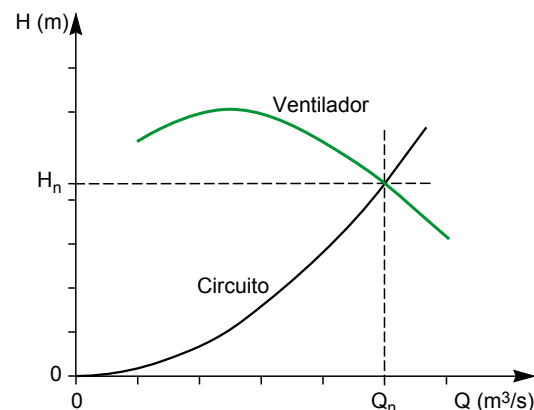


Fig. 31: Punto de funcionamiento de un ventilador en un circuito.

3.2 Funcionamiento a velocidad fija

Para variar el caudal de los ventiladores funcionando a velocidad fija se utilizan diversos tipos de aparatos mecánicos.

Aparatos colocados aguas abajo del ventilador

El principio consiste en colocar un aparato dentro del conducto de aire para controlar las caídas de presión del circuito. Dependiendo del tamaño del conducto, el aparato puede ser una válvula, una compuerta o un conjunto multicompuerta.

Este método es la manera más simple de variar el caudal, pero su eficiencia energética es baja. En la **figura 33**, se puede ver este sistema, en el que se pueden cambiar las características del circuito. Para los dos puntos de funcionamiento representados, los valores de la potencia útil, que son proporcionales a las áreas rectangulares sombreadas, son muy parecidos. Con caudales bajos, una parte significativa de la energía se disipa en el fluido.

Aparatos instalados aguas arriba del ventilador

El objetivo de estos aparatos es alterar la curva característica del ventilador, es decir, desplazar el punto de funcionamiento pero sin cambiar la curva característica del circuito. La eficiencia energética mejora significativamente porque, con un caudal reducido, el ventilador no produce presión superflua.

Se han desarrollado diversas tecnologías, incluyendo: registros, válvulas de mariposa, compuertas y aspas orientables.

Con todos estos aparatos, las curvas características del ventilador se modifican como se indica en la **figura 35**.

Los valores de la potencia útil son proporcionales a las áreas rectangulares sombreadas y podemos observar una reducción significativa de la potencia a caudal reducido. Esta alteración de las curvas características produce una menor pérdida de eficiencia que la causada por la instalación de una compuerta en cualquier punto del circuito.



Fig. 32: Ejemplo de una abertura o registro de multicompuerta.

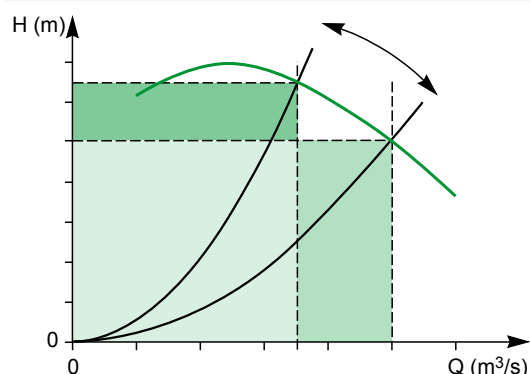


Fig. 33: Ajuste del caudal mediante un dispositivo aguas abajo.

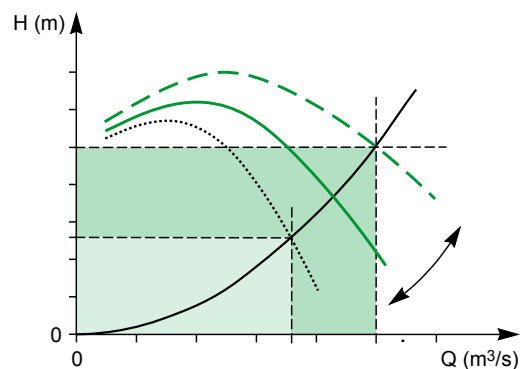


Fig. 35: Ajuste del caudal mediante un dispositivo aguas arriba.

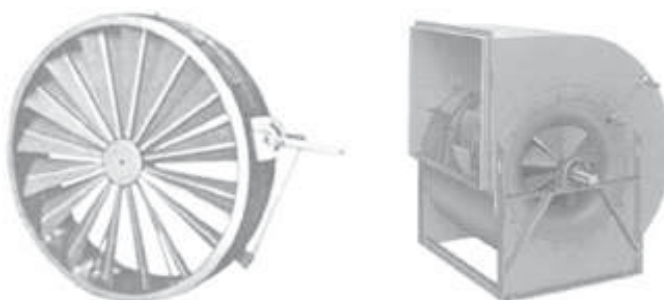


Fig. 34: Ejemplo de dispositivos situados aguas arriba: compuerta multi-lama (izquierda), aspas orientables (derecha).

Otros aparatos

Con ventiladores helicoidales, el caudal puede ajustarse variando el ángulo de las aspas. A causa de la complejidad del mecanismo, esta técnica sólo se utiliza en grandes ventiladores. Este método es de gran eficiencia energética.

El caudal también se puede ajustar utilizando un circuito bypass, pero es antieconómico ya que el consumo de energía es siempre el máximo independientemente del caudal efectivo.

Observaciones.

En muchos casos, los ventiladores están sobredimensionados para obtener un caudal máximo que es más grande que el caudal necesario. En este caso, se instalan compuertas para reducir el caudal o la velocidad del aire de la salida y se ajustan en la puesta en marcha de la instalación. Esto resulta en una caída de presión constante que reduce la eficiencia energética.

Otro inconveniente del funcionamiento a velocidad fija es que el nivel de ruido es siempre máximo.

3.3 Funcionamiento a velocidad variable

Las características fundamentales de un ventilador están vinculadas directamente a su velocidad de giro. Si consideramos el ventilador individualmente a una velocidad con giro N diferente de la velocidad nominal N_n :

- el caudal Q es proporcional a (N/N_n) ,
- la altura manométrica H es proporcional a $(N/N_n)^2$,
- la potencia P es proporcional a $(N/N_n)^3$.

Basándonos en la curva característica a velocidad nominal, la curva característica $H(Q)$ a una velocidad diferente se puede trazar, con puntos homólogos, formando una parábola como se ilustra en la **figura 36**.

Análogamente, la curva característica $P(Q)$ se puede trazar, con los puntos homólogos, formando una curva cúbica, como se ilustra en la **figura 37**.

La **figura 38** muestra el desplazamiento de la curva característica a diferentes velocidades y el caudal resultante para un circuito determinado.

Variar la velocidad permite utilizar el ventilador siempre a su nivel más alto de eficiencia. Esto significa que las áreas rectangulares sombreadas son directamente proporcionales a la potencia absorbida por los ventiladores.

La variación de la velocidad es, por tanto, el método que ofrece la mayor eficiencia energética. La **figura 39** compara las variaciones de potencia que producen los tres métodos principales de variación del caudal: aparato instalado aguas arriba, velocidad variable.

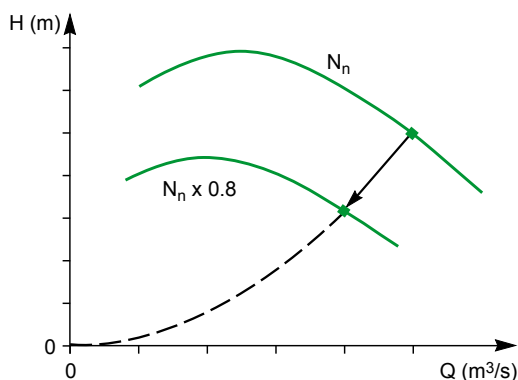


Fig. 36: Curvas características de un ventilador a dos velocidades diferentes.

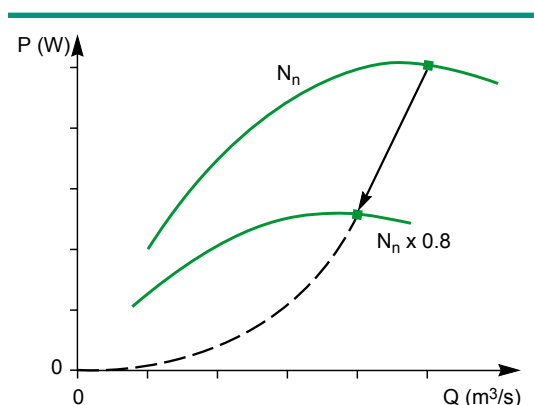


Fig. 37: Curvas características $P(Q)$ de un ventilador a dos velocidades diferentes.

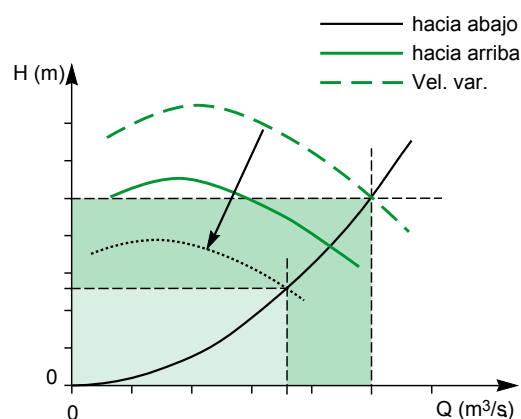


Fig. 38: Variación de caudal por variación de la velocidad del ventilador.

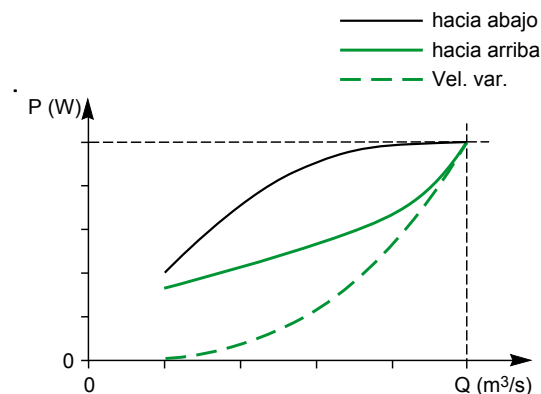


Fig. 39: Curva potencia/caudal para varios métodos de regulación.

Ejemplos de cálculos de reducción de potencia

Consideraremos un ventilador centrífugo de una potencia de 100 kW.

El ventilador está ligeramente sobredimensionado, lo que significa que el caudal máximo en el circuito debe ajustarse al 90% del caudal nominal del ventilador para limitar la velocidad del aire en la salida.

En un periodo de 24 horas, se requiere un caudal del 90% para un periodo de 12 horas (día) y un caudal de 50% para un periodo de 12 horas (noche).

Deseamos comparar los diferentes métodos de regulación.

Rendimiento del motor:

- $\eta_{\text{motor}} = 0,95$ a velocidad nominal,
- $\eta_{\text{motor}} = 0,94$ al 90% de la velocidad nominal,
- $\eta_{\text{motor}} = 0,89$ al 50% de la velocidad nominal.

Rendimiento del variador de velocidad:

$\eta_{\text{var}} = 0,97$.

La potencia absorbida por este ventilador con los diferentes métodos de regulación se puede ver en las curvas mostradas anteriormente en la **figura 39** y se detalla en la **figura 40**.

La fórmula general de cálculo de la potencia, a velocidad nominal, es la siguiente:

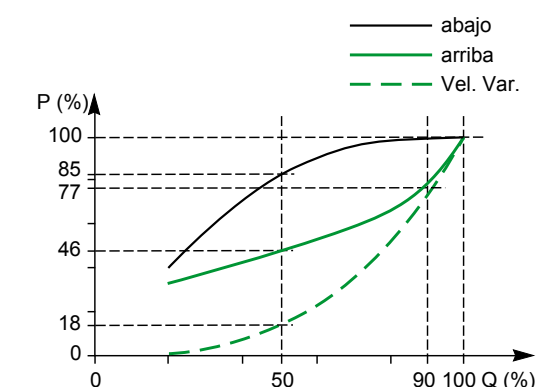


Fig. 40: Variación de la potencia absorbida.

$$P_f = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{\text{motor}}} \cdot P(Q)$$

A velocidad reducida, la fórmula tiene en cuenta la eficiencia del variador de velocidad:

$$P_f = P_n \cdot \frac{1}{\eta_{\text{motor}}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{variador}}} \cdot P(Q)$$

En la tabla siguiente se muestran los resultados del cálculo de la potencia para los diferentes métodos, en kW.

Método	kW con 0,9 x Q _n	kW con 0,5 x Q _n
Aguas abajo	105	89
Aguas arriba	80	48
Variador de velocidad	84	21

La energía consumida se calcula multiplicando la potencia por el tiempo de funcionamiento, para cada periodo (día y noche): 12 horas/día x 365 días = 4 380 horas/año, asumiendo que el ventilador está en marcha continuamente.

Asumiendo un coste de 0,05 €/kWh, el uso de la velocidad variable permite un ahorro anual de 19 600 € comparado con utilizar un aparato

instalado aguas abajo, y 5 100 € comparado con utilizar un aparato instalado aguas arriba.

El software de aplicación Eco8 presentado anteriormente, permite realizar este tipo de cálculo para todos los casos (selección de la potencia del motor, control del caudal aguas arriba o aguas abajo, definición de la velocidad de funcionamiento).

Método	kWh
Aguas abajo	852 947
Aguas arriba	562 484
Variador de velocidad	460 661

Ventiladores funcionando en paralelo

Los fluidos gaseosos pueden ser impulsados con caudales elevados instalando ventiladores en paralelo. Generalmente, se usan ventiladores idénticos. La curva característica se obtiene por la suma de caudales a una misma presión, como se ilustra en la **figura 41**.

Podemos ver que en un circuito determinado, como resultado del aumento cuadrático en la caída de presión en función del caudal, el caudal resultante con dos ventiladores, no es el doble del caudal obtenido con un solo ventilador.

El caudal Q_1 representado en la **figura 41**, se puede obtener haciendo funcionar sólo el ventilador 1 a su velocidad nominal o haciendo funcionar los dos ventiladores a la vez a velocidad reducida. Se puede ver este tipo de funcionamiento en la **figura 42**, que representa la curva característica de los dos ventiladores que están funcionando al mismo tiempo a velocidad reducida N_r .

En el ejemplo representado, la velocidad reducida es aproximadamente igual a $2/3$ de la velocidad nominal N_n . Por tanto, cada ventilador absorbe una potencia de $(2/3)^3$ veces la potencia nominal P_n de un ventilador.

Por tanto, la potencia total es:

$$P_t = 2 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^3 \cdot P_n \approx 0,6 \cdot P_n$$

Por tanto, utilizar dos ventiladores a velocidad reducida ahorra por tanto un 40% de energía respecto a la consumida con un único ventilador a velocidad nominal.

El ahorro de energía conseguido es incluso mayor con una configuración multi-ventilador funcionando a una presión muy baja o incluso nula.

Consideremos, por ejemplo, una configuración donde seis ventiladores de potencia nominal P_n están instalados en paralelo, con poca presión de salida.

Para obtener un caudal igual a la mitad del caudal máximo, tres ventiladores pueden estar funcionando a velocidad nominal o todos, los seis ventiladores, pueden funcionar a la mitad de la velocidad nominal.

En el primer caso, la potencia sería:

$$P_1 = 3 \cdot P_n$$

En el segundo caso, la potencia sería:

$$P_2 = 6 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 \cdot P_n = \frac{3}{4} \cdot P_n = \frac{P_1}{4}$$

Por tanto, este es otro ejemplo en el que se reduce sustancialmente el consumo, cuando se utilizan variadores de velocidad.

Para controlar la velocidad de los ventiladores, Schneider Electric ofrece la gama de variadores de velocidad Altivar 21, que está especialmente adaptada a la calefacción, la ventilación y el aire acondicionado (HVAC).

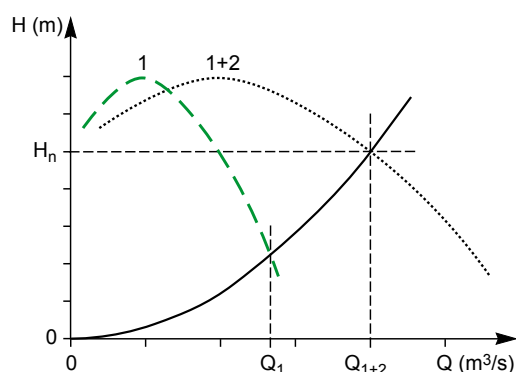


Fig. 41: Curva característica de dos ventiladores funcionando en paralelo.

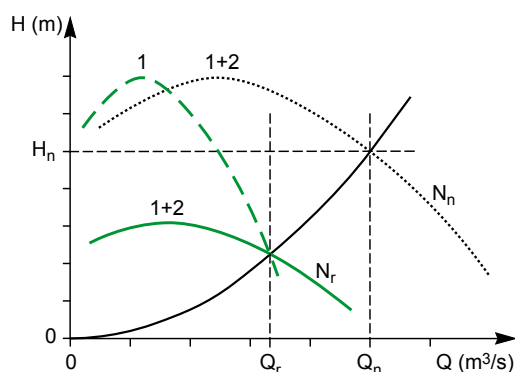


Fig. 42: Funcionamiento de dos ventiladores a velocidad reducida.



Fig. 43: Gama de variadores de velocidad Altivar 21 de Schneider Electric.

4 Compresores

4.1 Generalidades

La función fundamental de un compresor es aumentar la presión de un gas de la presión de succión hasta la presión de descarga.

La compresión de aire y gas tiene numerosas aplicaciones en la industria. Se pueden citar:

- La producción de energía mecánica para diferentes tipos de actuadores (atornilladores, cilindros (gatos) neumáticos, etc.).
- La producción de gases industriales para su licuefacción (nitrógeno, oxígeno, gas natural, etc.).

- Aire acondicionado y refrigeración.

- Aireación en tratamiento de aguas residuales en plantas depuradoras.

Las necesidades en términos de caudal y presión varían mucho, por eso se han desarrollado diferentes tecnologías. Las más comunes son:

- compresores centrífugos,
- compresores de tornillo,
- compresores de pistones,
- compresores de paletas,
- turbocompresores.

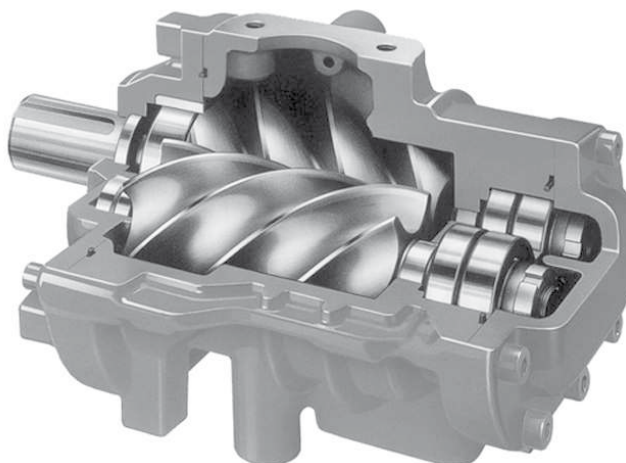


Fig. 44: Ejemplo de compresor de tornillo.

En general, el par de motor desarrollado aumenta con la velocidad, pero el par de arranque, a veces, puede ser alto, como en el caso de los compresores de pistones.

Como pudimos ver antes, con las bombas y los ventiladores, el punto de funcionamiento del compresor depende en las características del circuito del fluido, como se ilustra en la siguiente **figura 45** (para un compresor centrífugo).

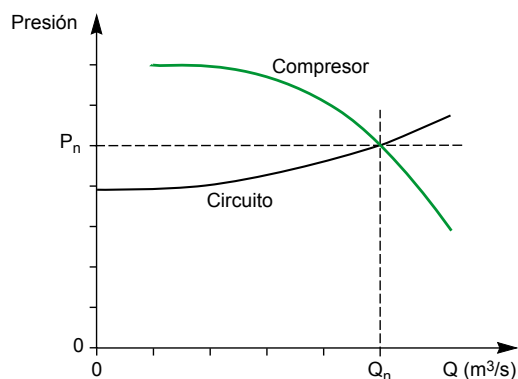


Fig. 45: Punto de funcionamiento de un compresor centrífugo.

4.2 Funcionamiento con carga variable

Para atender las fluctuaciones de demanda del sistema, todos los compresores incorporan un aparato para la regulación de presión. Se citan a continuación los métodos principales de regulación, que son adecuados a las características de las diferentes tecnologías:

- Arranque y parada del compresor.

El funcionamiento intermitente es adecuado para los compresores de potencia baja que pueden arrancarse frecuentemente sin inconvenientes inaceptables. Durante las fases de funcionamiento, el compresor funciona a su nivel óptimo de eficiencia.

- Recirculación o evacuado del exceso de caudal. Por su baja eficiencia energética, este método de funcionamiento sólo se aplica a los sistemas de baja potencia.

- Reducción de parte o de toda la carga mediante la actuación de la válvula o la compuerta de succión del compresor. El compresor trabaja a una carga reducida o cero, así se reduce la potencia eléctrica absorbida.

- Instalación de varios compresores en paralelo. El número de compresores en marcha puede ajustarse a la demanda.

- Variación de la velocidad del compresor. Este método es el que tiene mejor rendimiento energético.

4.3 Funcionamiento a velocidad variable

Variar la velocidad de un compresor es un método adecuado para la mayoría de las tecnologías. Presenta un gran número de ventajas:

- Arranque en rampa: sin picos de corriente, se reduce el estrés mecánico.

- Regulación precisa de la presión. La velocidad del compresor y, por tanto, el caudal pueden ajustarse a la demanda, lo que reduce la amplitud de las fluctuaciones de presión y el tamaño de los depósitos de acumulación.

- Eficiencia óptima: funcionar sin caídas de presión en el circuito, permite la reducción de las pérdidas de energía.

La variación de velocidad también es adecuada para los compresores que trabajan en paralelo. En general, sólo uno de los compresores funciona a velocidad variable, mientras los otros lo hacen en marcha - paro.

La **figura 46** muestra las curvas típicas de variación de potencia para los diferentes métodos de control del caudal.

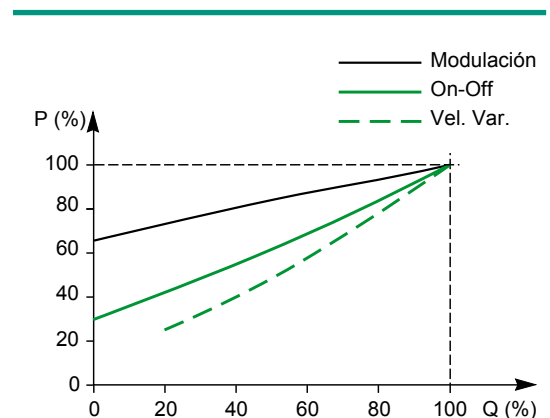


Fig. 46: Comparación entre los diferentes modos de regulación de los compresores.

5 Conclusión

El uso de la variación de velocidad en máquinas para fluidos, como bombas, ventiladores y compresores, es la mejor manera de reducir el consumo de energía en numerosas instalaciones industriales y comerciales.

El ahorro de energía es particularmente significativo si se utilizan con frecuencia caudales reducidos.

Las inversiones en variadores de velocidad se amortizan en tiempos muy cortos y posteriormente generan ahorros considerables.

En estas aplicaciones, los variadores de velocidad, además del ahorro de energía, aportan muchas otras ventajas. En concreto, las exigencias mecánicas, como golpe de ariete, cavitación y picos de par motor se reducen

sustancialmente mediante las aceleraciones y desaceleraciones graduales y controladas del motor. La vida útil de los equipos, por tanto, aumenta.

Además, la regulación del proceso se mejora y simplifica significativamente, porque se puede conseguir una regulación fina del caudal y la presión.

Está fuera del alcance de este documento explicar a fondo del funcionamiento de bombas, ventiladores y compresores. Sin embargo, se han presentado los principios básicos junto con ejemplos que ilustran el ahorro de energía que puede conseguirse con el uso de variadores de velocidad.

Anexo 1: Bibliografía

- Folletos técnicos de la Oficina Internacional del Agua, Limoges, Francia.
- “Entrainements électriques à vitesse variable”, Prométhée, Schneider Electric.
- “Improving pumping system performance”, Departamento de Energía de Estados Unidos.
- Guía técnica “Systèmes de ventilation”. HydroQuébec, Montreal, Canadá.
- Guía técnica “Systèmes de compression et de réfrigération”, HydroQuébec, Montreal, Canadá.
- “Energy Efficiency Guide Book”. Departamento de Eficiencia Energética, India.
- “Energy savings with electric Motors and drives”. Grupo AEA, UK.