

4 Ahorro energético en motores eléctricos

Los motores eléctricos son dispositivos electromecánicos rotativos que, mediante un campo magnético, convierten la energía eléctrica, procedente de una fuente de continua o alterna, en mecánica, y que a su vez sirve para el accionamiento de equipos industriales mediante un eje rotatorio.

Los diferentes tipos de motores que existen se muestran en la imagen siguiente, tanto de corriente continua como de corriente alterna:

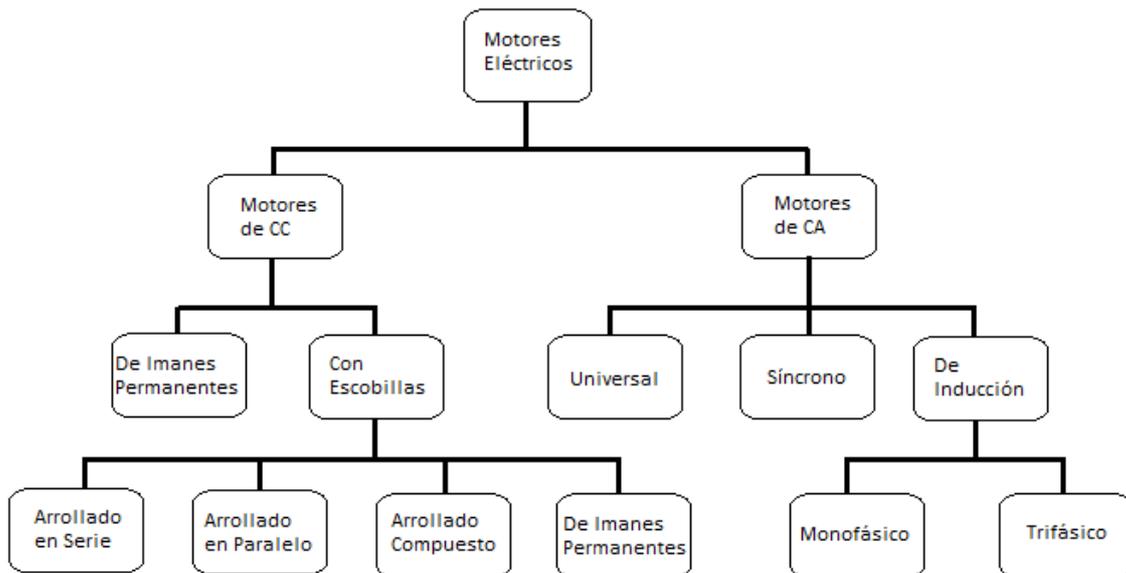


Figura 13 Cuadro resumen tipos de motores

Las características de los motores mostrados son las siguientes:

Motor de corriente continua con escobillas

Las principales características son las siguientes:

- Alta dificultad en la construcción implicando un mayor coste
- Baja fiabilidad y altos requerimientos de mantenimiento (escobillas y desgaste del conmutador)
 - Baja eficiencia
 - Elevadas interferencias electromagnéticas (Electromagnetic Interference (EMI))
- Facilidad en el control de velocidad/par, necesitando componentes electrónicos muy baratos

Motor de corriente continua de imanes permanentes

Características principales:

- Dificultad media en la construcción
- Coste moderado o alto dependiendo de los materiales magnéticos
- Alta fiabilidad (sin escobillas), incluso a altas velocidades

- Alta eficiencia
- Baja interferencia electromagnética
- Accionado por un inversor multifase
- Posibilidad de control de velocidad sin sensores

Motor de inducción.

Características principales:

- Complejidad baja en la construcción,
- Alta fiabilidad (no incluye escobillas), incluso a velocidades altas
- Eficiencia media a baja potencia (por debajo de 2,2 kW), alta eficiencia a alta potencia
- Accionados directamente por la red eléctrica o por un inversor
- Baja interferencia electromagnética
- Posibilidad de control de velocidad sin sensores
- Bajo coste por kW entre las diferentes tecnologías de motores

Motor síncrono

Características principales:

- Dificultad de construcción media debida al bobinado del rotor, anillos rozantes/escobillas o generador de DC sin escobillas
- Fiabilidad media, si se utilizan anillos rozantes/escobillas
- Eficiencia muy alta
- Baja interferencia electromagnética
- Coste elevado
- Posibilidad de regular el factor de potencia
- Velocidad muy precisa

Motor universal

Principales características:

- Funciona tanto con DC como con AC
- Elevada dificultad en la construcción
- Fiabilidad baja y tiempo de vida muy limitado
- Bajo rendimiento
- Elevada interferencia electromagnética
- Buena relación entre potencia y peso, si funciona a altas velocidades

Aunque existen diversos tipos de motores eléctricos, como se ha apuntado, los que tienen mayor relevancia desde el punto de vista de su aplicación industrial, son los motores de inducción. El motor de inducción es posiblemente una de las máquinas eléctricas más extendidas en la industria, dado su simplicidad, bajo coste, economía y fiabilidad.

La conversión de la energía en los motores eléctricos no es ideal, puesto que lleva asociada unas pérdidas, generalmente pequeñas, que hacen que la temperatura del motor se eleve sobre la del ambiente y, por tanto, que el motor consuma más energía de la que transforma en energía mecánica. En la Fig. 14, se muestran las distintas pérdidas de un motor eléctrico, a saber, pérdidas por efecto Joule estáticas, pérdidas en el hierro, pérdidas Joule rotóricas, pérdidas mecánicas y adicionales. El porcentaje de dichas pérdidas se puede ver en la Fig. 15.

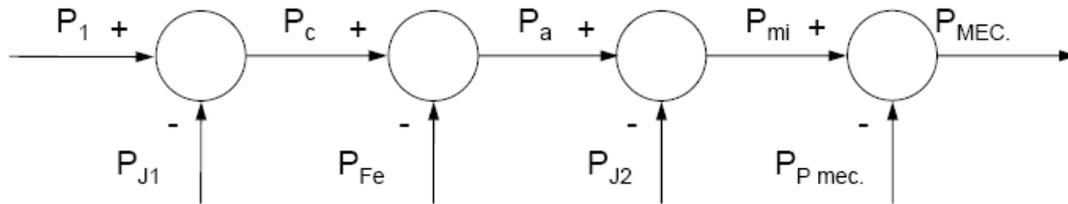


Figura 14 Pérdidas en un motor eléctrico de inducción

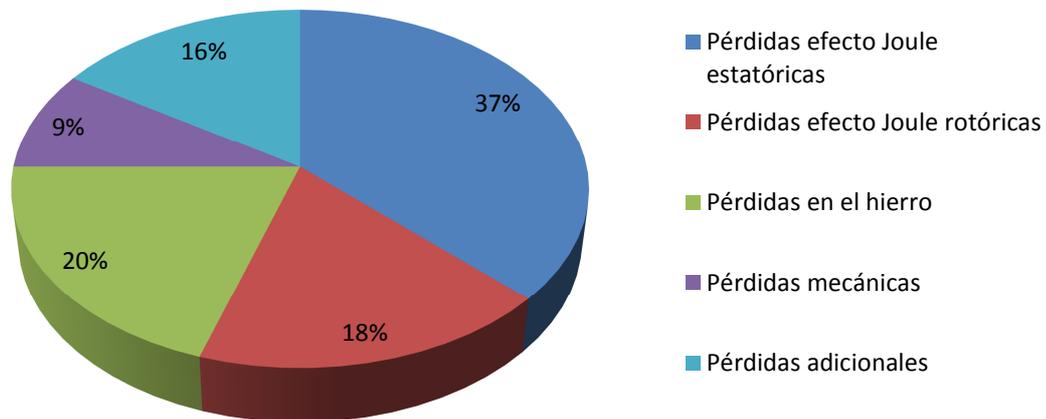


Figura 15 Porcentaje de pérdidas en un motor eléctrico a plena carga

La eficiencia o rendimiento de un motor se define como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, es decir:

$$\text{Rendimiento}(\eta) = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Reducir los costes de energía es una de las maneras que tiene una empresa para reducir gastos y continuar siendo competitivos. Mediante la instalación de un motor con buen rendimiento energético es posible obtener ahorros muy significativos. Este es precisamente el caso en el momento de considerar entre una nueva instalación y paquetes de equipos, substituir los motores demasiado grandes y de baja carga, hacer modificaciones importantes en las instalaciones o en los procesos, en lugar de reparar o rebobinar un motor estropeado. Los motores de alto rendimiento suponen un ahorro porque reducen los costes de energía. Incluso un

pequeño aumento de la eficiencia supone un ahorro sustancial del coste total del motor, teniendo en cuenta tanto los costes de funcionamiento como los de inversión.

Un motor con alto rendimiento energético produce la misma potencia de salida pero necesita menos potencia eléctrica absorbida (kW) que un motor de rendimiento estándar. Este mayor rendimiento se consigue utilizando chapa magnética más delgada y de mayor calidad en el estator para reducir las pérdidas en el hierro, y más cobre en las ranuras para reducir las pérdidas I^2R . Los motores con alto rendimiento energético también reducen las pérdidas por ventilación y por dispersión (suma de pérdidas) [1].

A continuación se muestra en la Fig. 16, las características eléctricas y constructivas de un motor de alto rendimiento [11], como pueden ser las pérdidas Joule mediante el incremento de la sección de las ranuras del estator y la sustitución del aluminio por cobre en el rotor. Además se pueden reducir las pérdidas en el hierro consiguiendo una inducción menor, una chapa magnética más delgada, incrementando la resistividad con la inyección de más silicio. Por otro lado, se reducen las pérdidas mecánicas y el calentamiento, mediante un ventilador y optimizando la capacidad de transferencia de energía, respectivamente.

- Rendimiento superior al motor convencional
 - Incluso con carga parcial
- Reducción pérdidas Joule:
 - Incremento sección ranuras estator
 - Sustitución aluminio por cobre en rotor
- Reducción pérdidas hierro
 - Inducción menor: longitud de inducido mayor
 - Chapa magnética más delgada
 - Incremento resistividad mediante la inyección de más silicio
- Reducción pérdidas mecánicas
 - Ventilador (reducción ruido)
- Reducción calentamiento
 - Menos pérdidas
 - Optimización capacidad de transferencia
- Incremento peso

Figura 16 Características eléctricas y constructivas de un motor de A.R.

En la Fig. 17, se pueden ver los cambios citados anteriormente, aplicados a un motor estándar.

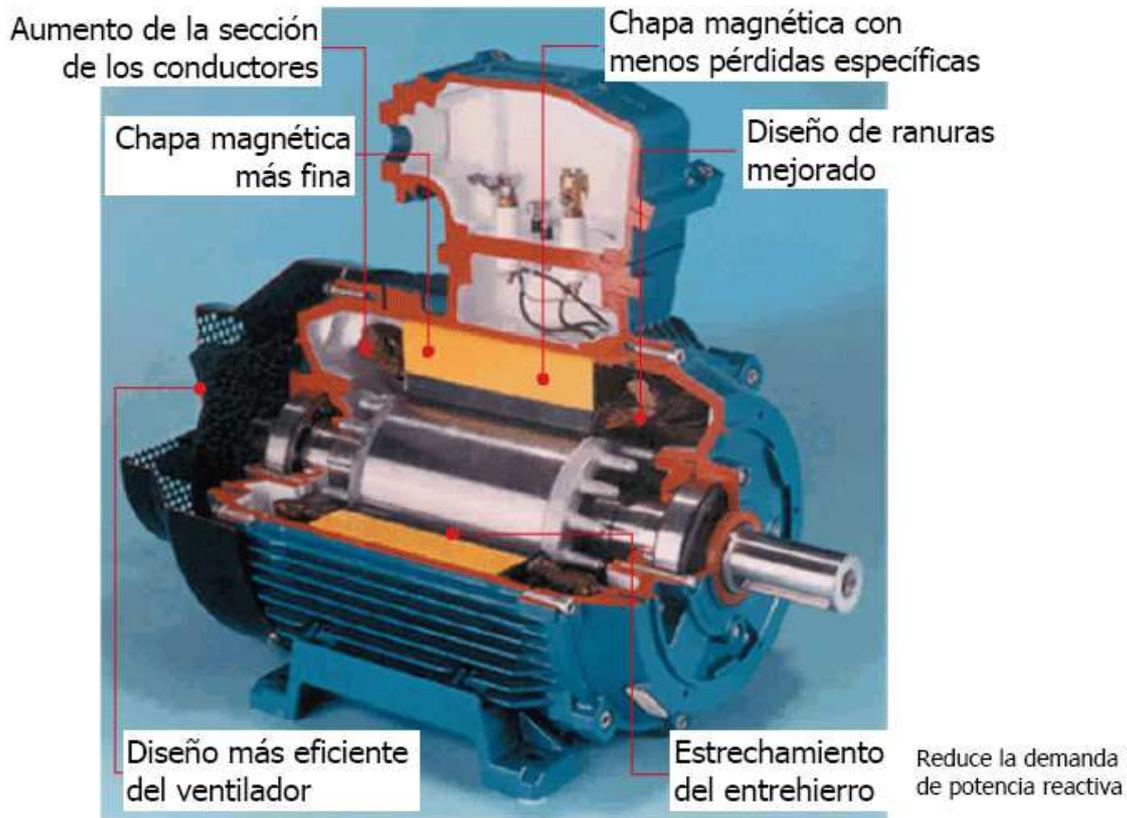


Figura 17 Cambios de un motor estándar por uno de alto rendimiento

4.1 Medidas de ahorro y eficiencia energética

A continuación se va a ver las diferentes medidas de ahorro y eficiencia energética como son: la utilización de motores de alto rendimiento; y la instalación de variadores de frecuencia.

4.1.1 Utilización de motores de alto rendimientos

En la actualidad, se están fabricando motores eléctricos de inducción de corriente alterna de alta eficiencia, ya que estos nuevos motores tienen un menor consumo de energía y, sin embargo, pueden transmitir la misma potencia de salida que un motor de eficiencia estándar.

Los motores estándares tienen una eficiencia que varía entre el 80 y 90%, mientras que en los motores de alta eficiencia, esta varía entre 87 y 96%, en función del tamaño del motor [12].

Al diseñar y fabricar motores de alta eficiencia, se tiene especial cuidado en reducir las pérdidas en el motor, pero, como consecuencia de ello, se incrementa el costo de dichos motores, ya que en su fabricación se emplean: materiales de mejor calidad, estatores más grandes, mayor cantidad de cobre en los devanados, rodamientos especiales, acero de mayor calidad, diseños nuevos en sus componentes, etc.

Sin embargo, el uso de un motor de alta eficiencia, en comparación con otro de eficiencia estándar, es bastante más atractivo económica y técnicamente. El mayor coste de la inversión que ello supone, queda compensado por una menor tasa de retorno de la misma.

En la Fig. 18, se observa el potencial ahorro de energía al utilizar tecnología más eficiente en un sistema compuesto por una bomba y un motor eléctrico. En dicha imagen se

utiliza un motor de alto rendimiento y un variador de frecuencia para mejorar el sistema estándar.

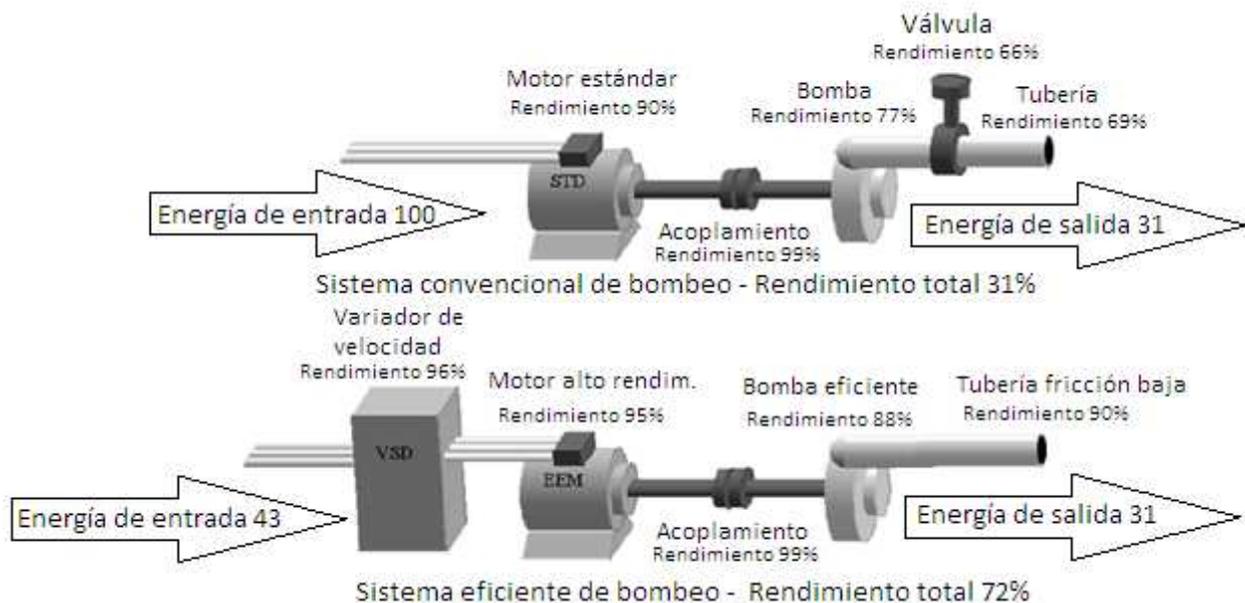


Figura 18 Eficiencia de un sistema con motor eléctrico, mostrando el potencial ahorro de energía

En la Unión Europea existe una clasificación energética de motores creada por el CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics). En dicha clasificación, se establecen cuatro tipos de motores según su rendimiento. Tal y como se muestra a continuación, los motores EFF1 corresponden a los de mayor eficiencia energética, mientras que los motores EFF3 serían los menos eficientes.

Dada la diversidad de clasificaciones energéticas de motores eléctricos que existen en el mundo (europea, norteamericana, australiana, china, japonesa, brasileña,...), para crear un sistema único el International Electrotechnical Commission (IEC) emitió en octubre de 2008 la norma IEC 60034-30 [13] "Rotating electrical machines" (Máquinas eléctricas rotativas).

En Europa se asume esta norma en el Reglamento (CE) N° 640/2009 de la Comisión de 22 de julio de 2009, por el que se aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico para los motores eléctricos.

Esta normativa establece una nueva clasificación energética que sustituye a la clasificación CEMEP, quedando dicha clasificación como sigue:

- IE4 – Eficiencia Súper Premium (bajo consideración)
- IE3 – Eficiencia Premium (equivalente a NEMA Premium)
- IE2 – Alta eficiencia (equivalente a EPAct/EFF1)
- IE1 – Eficiencia estándar (equivalente a EFF2)
- Sin designación – por debajo de eficiencia estándar – (equivalente a EFF3)

En una comparación directa entre ambas clasificaciones, la categoría EFF2 equivale a la IE1 y la EFF1 a la IE2, estableciéndose dos niveles más alto de eficiencia: IE3 e IE4.

A diferencia de la clasificación CEMEP, no se trata de un acuerdo voluntario entre fabricantes que comercializan sus motores en territorio europeo, sino que es de obligado

cumplimiento. De hecho, a partir del 16 de junio de 2011, sólo podrán comercializarse en el mercado europeo motores de 2 a 6 polos que como mínimo tengan una eficiencia energética IE2 (la equivalente a EFF1).

4.1.2 Instalación de variadores de frecuencia

La mayor parte de las bombas, compresores y ventiladores de uso industrial funcionan a velocidad constante. Esto obliga a ajustar el caudal suministrado por estos equipos aumentando artificialmente las pérdidas del sistema, por medio de algún dispositivo de estrangulamiento, que suele ser una válvula de ajuste o control en las aplicaciones de bombeo o las rejillas de control de tiro en ventilación. Este procedimiento lleva consigo que se produzcan unas pérdidas elevadas que suelen denominarse pérdidas por estrangulamiento. Estas pérdidas podrían evitarse dejando los dispositivos de estrangulamiento completamente abiertos (o eliminándolos) y utilizando un accionamiento (motor de inducción) con velocidad variable para ajustar la capacidad de funcionamiento [11].

Regulación de caudal:

1. Sistema de bombeo
 - 1.1. Estrangulamiento
 - 1.2. Recirculación de caudal (By-pass)
2. Sistemas de ventilación
 - 2.1. Rejillas de control de flujo de entrada



Figura 19 Sistemas de regulación de caudal en bombeo

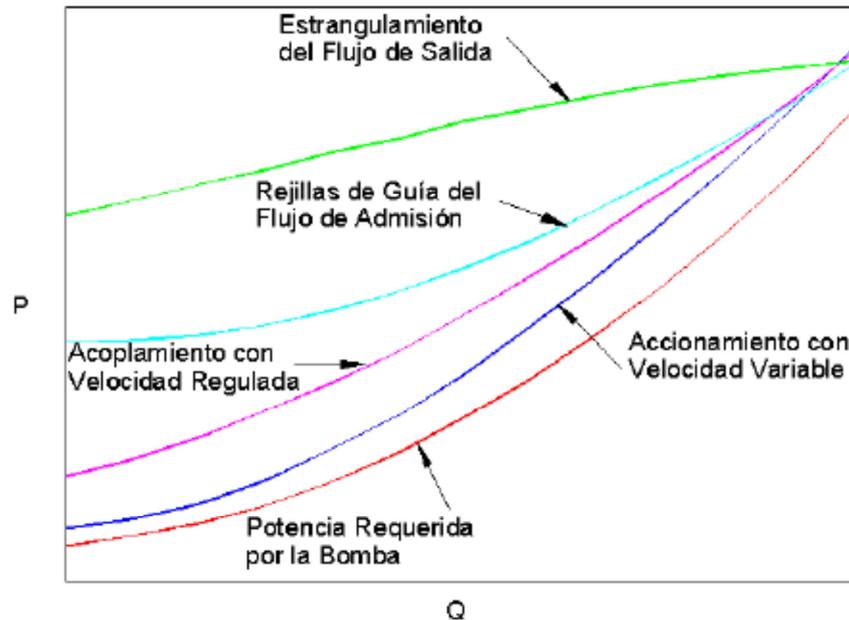


Figura 20 Comparación de los métodos de regulación de caudal

Como se puede observar en la Fig. 20, la regulación electrónica de velocidad se presenta como el método más eficaz de regular el caudal pues es la que más se ajusta a la potencia requerida por la bomba. A continuación se verán los distintos métodos que existen para regular el caudal.

La regulación por by-pass, Fig. 21, puede resultar la más adecuada desde punto de vista del mantenimiento, ya que ahorra arranques y paradas, sin embargo, presenta el inconveniente de no reducir la potencia demandada al motor cuando se disminuye el caudal. Representa, pues, el método de regulación más pobre desde el punto de vista energético.

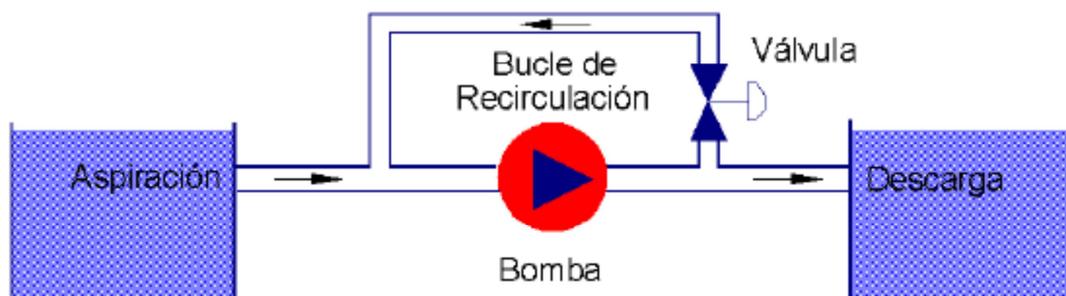


Figura 21 Recirculación de caudal (by-pass)

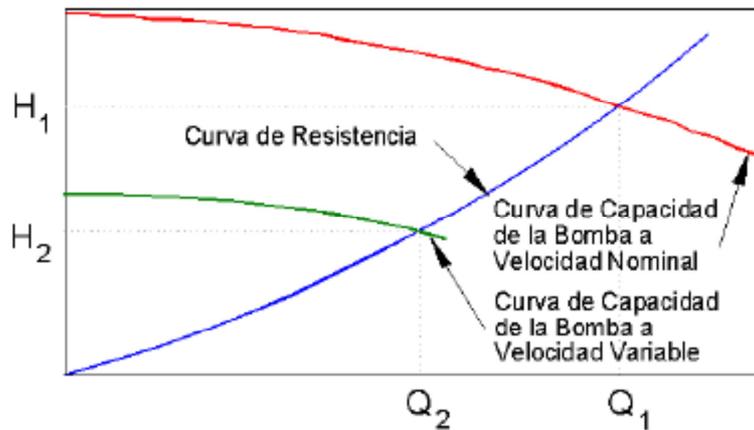


Figura 22 Variación de caudal por recirculación

La opción de arranque-parada, por arranque directo o estrella-triángulo es poco conveniente, pues conlleva una regulación demasiado escalonada, un elevado número de averías y el envejecimiento prematuro de la instalación y del motor.

La regulación por válvula de estrangulamiento, Fig.23, es la más extendida en la industria, aunque se puede conseguir ahorrar más energía y alargar aún más la vida de la instalación al instalar un regulador, debido a que consigue arranques y paradas más suaves. El regulador electrónico de velocidad alarga la vida de la bomba, ya que ésta depende fundamentalmente del número de vueltas que da el rodete, además, mediante el regulador se consigue la reducción del caudal a partir de una reducción de la velocidad.

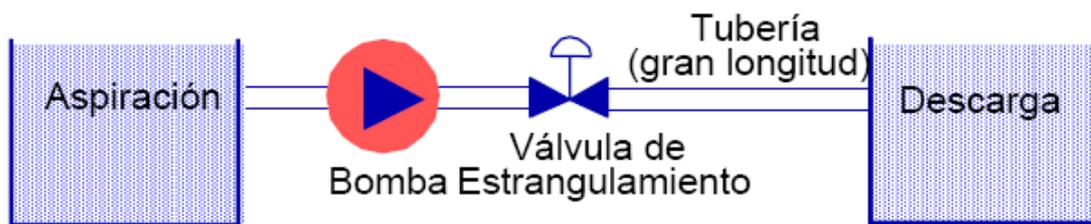


Figura 23 Estrangulamiento

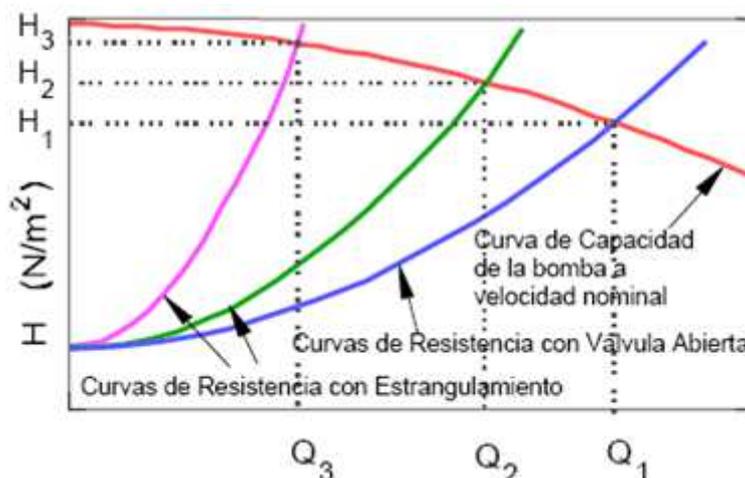
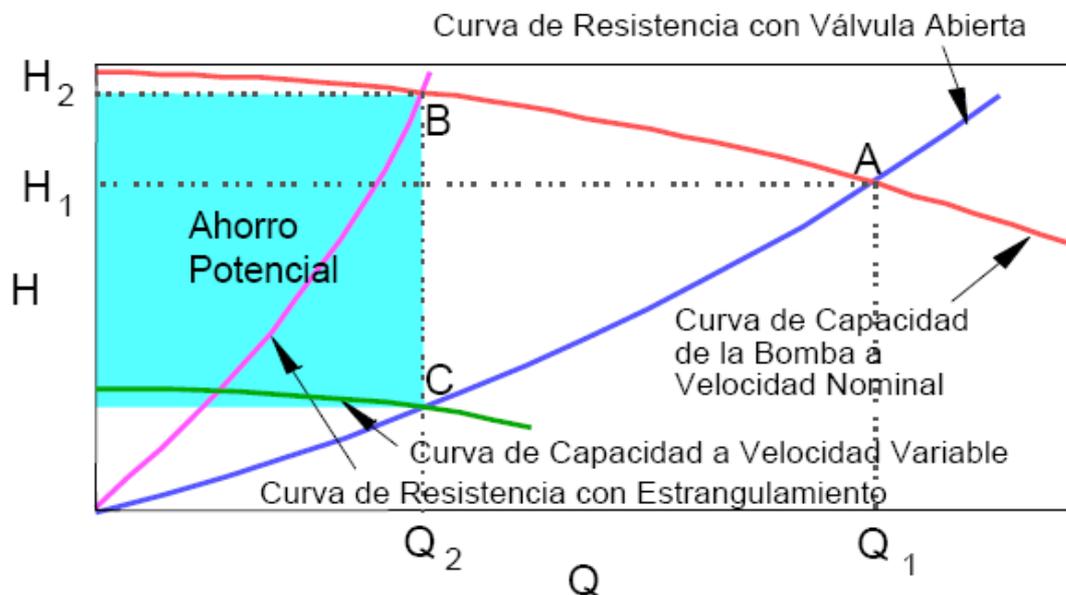


Figura 24 Variación de caudal por estrangulamiento

Aunque existen muchas razones que hacen aconsejable la utilización de motores de inducción con velocidad variable para el accionamiento de bombas y ventiladores, la reducción de los costes de explotación que lleva aparejada el ahorro energético que supone, suele ser el principal incentivo para su utilización.

En la Fig. 25, se puede observar el ahorro potencial que se obtendría si se regulase el caudal de una bomba mediante un variador de velocidad, en lugar de hacerlo a través de una válvula de estrangulamiento.

**Figura 25 Potencial ahorro con variadores frente a estrangulamiento**

Si bien es cierto que la sustitución de un sistema de velocidad constante por otro con velocidad variable conlleva un cierto ahorro energético y, en consecuencia, una reducción en los costes de explotación, la evaluación de estas reducciones energéticas y de costes suele exigir un completo análisis de la instalación. Dado que los equipos de control de velocidad de los motores de inducción son componentes relativamente costosos, el grado de reducción de los costes de explotación derivados del ahorro energético, debe ser lo suficientemente alto como para compensar el elevado costo inicial de adquisición de estos equipos de control. Esto reduce el número de aplicaciones en las que resulta rentable la utilización de accionamientos con velocidad variable. Por tanto, se deduce que, para cada accionamiento con velocidad variable, resulta fundamental llevar a cabo una evaluación económica realista del ahorro energético que implica, pues de ello va a depender una adecuada tasa de retorno de la inversión.

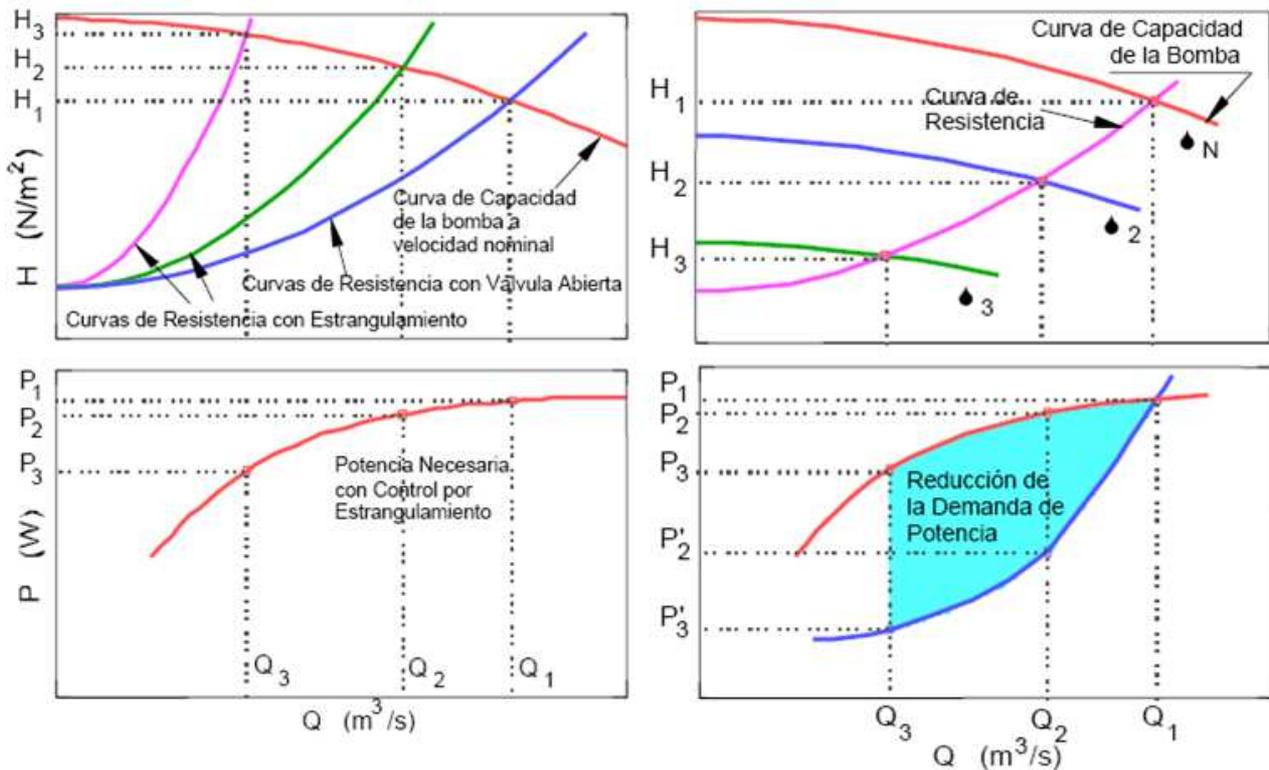


Figura 26 Reducción de la demanda de potencia con variador frente a estrangulamiento

En la Fig. 26, se muestra como con el uso de un regulador de velocidad se puede reducir la demanda de potencia, si se compara con el método más utilizado hasta ahora por las industrias que es el control por estrangulamiento. Ya que para disminuir el caudal no se tendría que reducir la sección de paso mediante una válvula, con lo que se ahorraría tanto en pérdidas, ya sean por fricción, como en energía, pues se podría disminuir la curva de capacidad de la bomba a una velocidad por debajo de la nominal.

En cuanto a los sistemas de ventilación, las rejillas de control de flujo de entrada como se puede ver en la Fig. 27, muestra como este método de control permite modificar la curva altura-caudal del ventilador sin alterar la curva resistente. Además, reduce el caudal de aire del ventilador de forma más eficiente que mediante el estrangulamiento de las rejillas de salida. La inclinación de las rejillas de admisión orienta la corriente de aire en el sentido de giro del ventilador, lo que reduce el caudal de aire que atraviesa el ventilador y la potencia requerida.

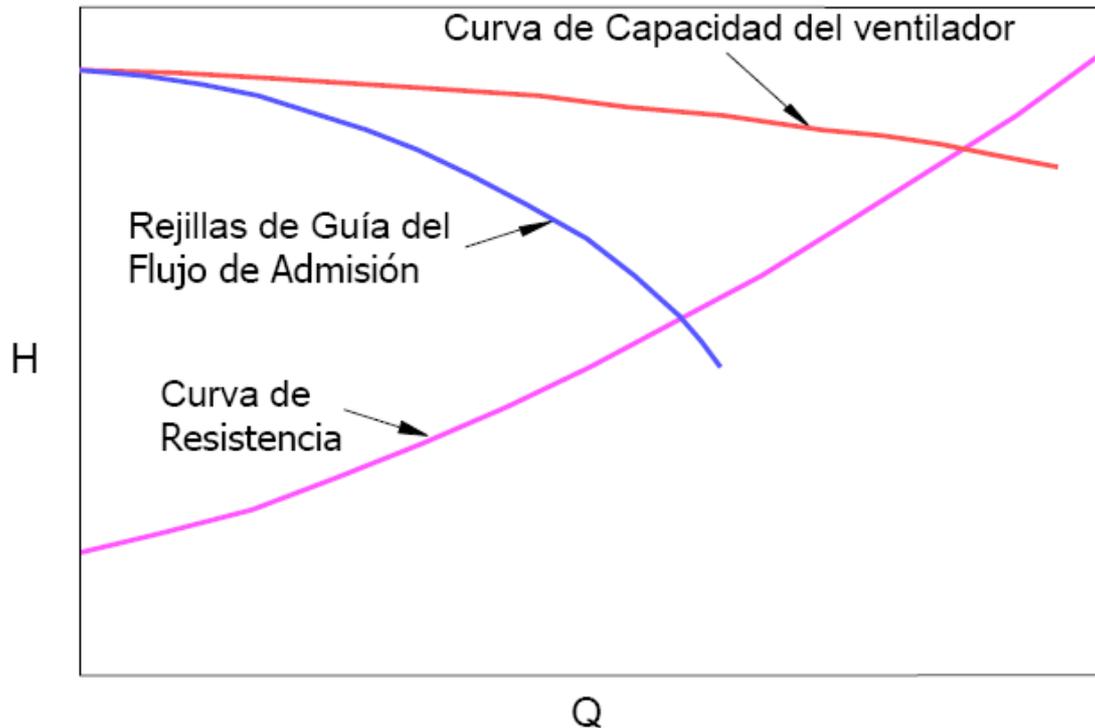


Figura 27 Variación del caudal mediante rejillas de guía del flujo de entrada

Según “*European Energy to 2020*” [14] el crecimiento medio anual en el consumo de electricidad en 2015, en el sector industrial será de un 1,2%. La Tabla 3, muestra el consumo de electricidad de los motores por rango de potencia para el sector industrial [15].

Tabla 3 Consumo eléctrico en motores de inducción

Rango de potencia (kW)	Sector Industrial
[0 - 0,75]	6,2
[0,75 - 4]	46,9
[4 - 10]	55,8
[10 - 30]	95,0
[30 - 70]	143,9
[70 - 130]	83,6
[130 - 500]	166,3
[500 - 1000]	123,5
TOTAL	721,3

Para la evaluación del potencial ahorro eléctrico con variadores de velocidad, dos condiciones han sido consideradas: ahorro económico (representa el ahorro energético que puede alcanzarse cuando la tecnología eficiente está aplicada únicamente a aplicaciones rentables) y ahorro técnico (representa el ahorro energético que puede alcanzarse aplicando los variadores de velocidad a todas las oportunidades posibles, independientemente de la relación coste-rendimiento de la medida).

Tipos y tensiones

Uso normal		Aplicaciones de cargas pesadas		Código de pedido ABB protección IP21	Código de tipo ABB protección IP21	Código de pedido ABB protección IP54	Código de tipo ABB protección IP54	Tamaño de bastidor	Precio unidades IP21 (Euros)	Precio unidades IP54 (Euros)
P_{motor} (kW)	I_{motor} (A)	P_{motor} (kW)	I_{motor} (A)							
Tensión de alimentación trifásica, de 208 a 240V										
0,75	4,6	0,75	3,5	3AJA0000003373	ACS550-01-04A6-2	3AJA0000004186	ACS550-01-04A6-2+B055	R1	774 €	869 €
1,1	6,6	0,75	4,6	3AJA0000003374	ACS550-01-06A6-2	3AJA0000004189	ACS550-01-06A6-2+B055	R1	909 €	1 004 €
1,5	7,5	1,1	5,6	3AJA0000003375	ACS550-01-07A5-2	3AJA0000004192	ACS550-01-07A5-2+B055	R1	958 €	1 063 €
2,2	11,8	1,5	7,5	3AJA0000003376	ACS550-01-012A-2	3AJA0000004195	ACS550-01-012A-2+B055	R1	1 041 €	1 136 €
4	16,7	3	11,8	3AJA0000003377	ACS550-01-017A-2	3AJA0000004198	ACS550-01-017A-2+B055	R1	1 180 €	1 275 €
5,5	24,2	4	16,7	3AJA0000003378	ACS550-01-024A-2	3AJA0000004182	ACS550-01-024A-2+B055	R2	1 461 €	1 584 €
7,5	30,8	5,5	24,2	3AJA0000003379	ACS550-01-031A-2	3AJA0000004199	ACS550-01-031A-2+B055	R2	1 797 €	1 920 €
11	46,2	7,5	30,8	3AJA0000003380	ACS550-01-046A-2	3AJA0000004202	ACS550-01-046A-2+B055	R3	2 216 €	2 406 €
15	59,4	11	46,2	3AJA0000003381	ACS550-01-059A-2	3AJA0000004205	ACS550-01-059A-2+B055	R3	2 722 €	2 912 €
18,5	74,8	15	59,4	3AJA0000003382	ACS550-01-075A-2	3AJA0000004208	ACS550-01-075A-2+B055	R4	3 433 €	3 718 €
22	88	18,5	74,8	3AJA0000003383	ACS550-01-088A-2	3AJA0000004211	ACS550-01-088A-2+B055	R4	4 076 €	4 381 €
30	114	22	88	3AJA0000003384	ACS550-01-114A-2	3AJA0000004214	ACS550-01-114A-2+B055	R4	4 766 €	5 051 €
37	143	30	114	3AJA0000007124	ACS550-01-143A-2	3AJA0000009151	ACS550-01-143A-2+B055	R6	8 491 €	9 406 €
45	173	37	150	3AJA0000007125	ACS550-01-178A-2	3AJA0000009153	ACS550-01-178A-2+B055	R6	10 350 €	11 265 €
55	221	45	178	3AJA0000007126	ACS550-01-221A-2	3AJA0000009154	ACS550-01-221A-2+B055	R6	12 575 €	13 490 €
75	248	55	192	3AJA0000007127	ACS550-01-248A-2	3AJA0000009155	ACS550-01-248A-2+B055	R6	14 247 €	15 244 €

Figura 28 Catálogo de precios para variadores de velocidad

El precio de los variadores de velocidad según la lista de precios del fabricante elegido de ámbito internacional, es el que se muestra en la Fig. 28.

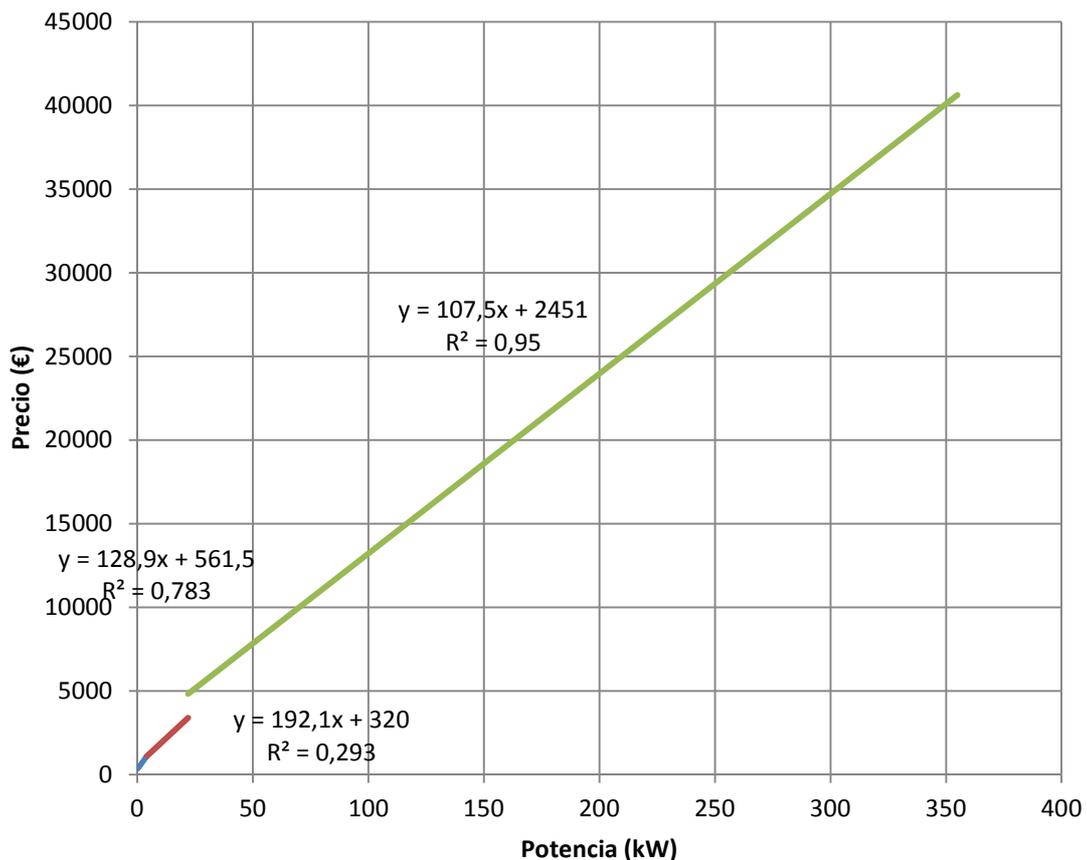


Figura 29 Precio de los VSD's

La Fig. 29, se ha obtenido a través de la lista de precios del fabricante, una vez se tienen todos los precios para cada potencia, se ajusta mediante una recta de regresión. Es necesario

indicar que se ha optado por hacer tres divisiones en cuanto a potencia, estas van desde [0-4] kW, [4-22] kW y desde [22-355] kW, el motivo es que el ajuste de esta manera es mejor que si se decidía hacer una sola recta de regresión. Los valores de la recta de regresión para cada tramo, respectivamente, son los siguientes:

$$\text{Precio} = 192,1 \cdot \text{Potencia} + 320 \quad [0-4] \text{ kW} \quad (2)$$

$$\text{Precio} = 128,9 \cdot \text{Potencia} + 561,5 \quad [4-22] \text{ kW} \quad (3)$$

$$\text{Precio} = 107,5 \cdot \text{Potencia} + 2451 \quad [22-355] \text{ kW} \quad (4)$$

Basado en el estudio llevado a cabo por el proyecto SAVE “*Improving the penetration of energy-efficient motors and drives*” [16], la Tabla 4, muestra el potencial ahorro técnico y económico para la Unión Europea en el sector industrial en 2015.

Tabla 4 Potencial ahorro por rango de potencia para el sector industrial en 2015 en Europa

TOTAL SECTOR INDUSTRIAL	AHORRO TÉCNICO (TWh)	AHORRO ECONÓMICO (TWh)
[0 - 0,75]	3,2	1,7
[0,75 - 4]	4,4	2,9
[4 - 10]	5,6	3,7
[10 - 30]	9,9	6,2
[30 - 70]	15	10,4
[70 - 130]	9,2	6,9
[130 - 355]	17,5	12,9
TOTAL	64,8	44,7

Si se observa la Tabla 5, se muestra el ahorro técnico estimado para 2015 por sectores para Europa [17]:

Tabla 5 Ahorro técnico por sectores en Europa en 2015

AHORRO TÉCNICO	VSD (TWh)
Sector Químico	12,8
Sector alimentos, bebidas y tabaco	8,3
Sector siderúrgico y del hierro	5,1
Sector maquinaria y metal	6,7
Sector mineral no metálico	5,8
Sector papel y celulosa	15,3
Otras industrias	10,8
TOTAL	64,8